

Ein Ingenieurmodell zur Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Öffnungen

Vom Fachbereich Bauwissenschaften
der Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Carina Neff
aus Darmstadt

Essen 2006

Dipl.-Ing. Carina Neff

Geboren 1976 in Darmstadt. Von 10/1995 bis 04/2001 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 06/2001 bis 04/2004 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 04/2004 bis 04/2006 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen. Seit 05/2006 bei Hochtief Konstruktion AG, Consult IKS Energy.

| | |
|-----------------------------|---|
| Referentin: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held |
| Korreferent: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser |
| Tag der Einreichung: | 06.04.2006 |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 09.08.2006 |

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Universität Duisburg-Essen und am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held danke ich herzlich für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie die in jeder Hinsicht gewährte Unterstützung während meiner gesamten Tätigkeit.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats und für sein Interesse an meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Massivbau. Die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Stellvertretend für das ganze Institut sei an dieser Stelle meinem Zimmerkollegen Markus Aldejohann gedankt.

Zahlreiche Studenten haben im Rahmen von Diplom- und Vertieferarbeiten Beiträge zur vorliegenden Arbeit geleistet, wofür ich mich an dieser Stelle herzlich bedanke.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern für ihre Unterstützung während meiner gesamten Studien.

Essen, im August 2006

Carina Neff

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------|---|-----------|
| KAPITEL 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 | Problemstellung | 1 |
| 1.2 | Ziel und Inhalt der Arbeit..... | 3 |
| | | |
| KAPITEL 2 | STAND DER FORSCHUNG | 7 |
| 2.1 | Vorbemerkungen..... | 7 |
| 2.2 | Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen | 7 |
| 2.2.1 | Versuche an Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen | 7 |
| 2.2.2 | Bemessungskonzepte für Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen | 8 |
| 2.2.2.1 | Bemessungskonzept nach Ehmann | 8 |
| 2.2.2.2 | Bemessungskonzept nach Mansur und Tan | 10 |
| 2.2.2.3 | Bemessungskonzept nach Schlaich und Schäfer | 11 |
| 2.2.2.4 | Bemessungskonzept nach Hottmann et al. | 11 |
| 2.2.2.5 | Bemessungskonzept nach Leonhardt | 14 |
| 2.2.2.6 | Bemessungskonzept nach Elgehausen und Gerster..... | 14 |
| 2.2.2.7 | Bemessungskonzept nach Wommelsdorff | 14 |
| 2.2.3 | Ermittlung der Durchbiegung von Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen | 14 |
| 2.3 | Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen | 15 |
| 2.3.1 | Versuche an Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen..... | 15 |
| 2.3.2 | Bemessungskonzepte für Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen..... | 16 |
| 2.3.3 | Ermittlung der Durchbiegung von Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen..... | 19 |
| 2.4 | Spannbetonträger mit Einzelöffnungen | 20 |
| 2.4.1 | Vorbemerkungen | 20 |
| 2.4.2 | Versuche an Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen..... | 20 |
| 2.4.3 | Bemessungskonzepte für Spannbetonträger mit Einzelöffnungen..... | 20 |
| 2.4.4 | Ermittlung der Durchbiegung von Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen..... | 21 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 2.5 | Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen | 21 |
| 2.5.1 | Versuche an Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen | 21 |
| 2.5.2 | Bemessungskonzepte für Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen | 22 |
| 2.5.3 | Ermittlung der Durchbiegung von Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen | 22 |
| 2.6 | Bewertung der durchgeführten Versuche und Bemessungskonzepte | 23 |

KAPITEL 3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG AN STAHLBETONTRÄGERN MIT GROßEN EINZELÖFFNUNGEN..... 25

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.1 | Vorbemerkungen | 25 |
| 3.2 | Versuchsaufbau..... | 25 |
| 3.3 | Versuchsprogramm | 30 |
| 3.4 | Bestimmung der spezifischen Betoneigenschaften | 33 |
| 3.5 | Messtechnik..... | 34 |
| 3.5.1 | Übersicht..... | 34 |
| 3.5.2 | Photogrammetrische Messungen | 37 |
| 3.6 | Auswertung der Versuchsergebnisse | 39 |
| 3.6.1 | Allgemeines | 39 |
| 3.6.2 | Versagenslasten und Entstehung des ersten Fließgelenkes | 40 |
| 3.6.3 | Querkraftverteilung auf die Gurte..... | 42 |
| 3.6.3.1 | Vorgehensweise..... | 42 |
| 3.6.3.2 | Ergebnisse | 44 |
| 3.6.4 | Lage des Momentennullpunktes in den Gurten..... | 46 |

KAPITEL 4 GRUNDLAGEN DER NUMERISCHEN BERECHNUNGEN ... 49

| | | |
|------------|---------------------------|-----------|
| 4.1 | Allgemeines..... | 49 |
| 4.2 | Modellierung | 49 |

| | | |
|------------|---------------------------------------|-----------|
| 4.3 | Materialmodelle..... | 51 |
| 4.3.1 | Rechenkonzept..... | 51 |
| 4.3.2 | Beton unter Druckbeanspruchung..... | 51 |
| 4.3.3 | Beton unter Zugbeanspruchung..... | 55 |
| 4.3.4 | Tension-Stiffening-Effekt..... | 59 |
| 4.3.5 | Betonstahl | 60 |
| 4.3.6 | Verbund zwischen Beton und Stahl..... | 62 |
| 4.3.7 | Fazit | 63 |

KAPITEL 5 AUSWERTUNG UND INTERPRETATION DER NUMERISCHEN BERECHNUNGEN..... 65

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.1 | Vorgehensweise..... | 65 |
| 5.2 | Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen | 65 |
| 5.2.1 | Verifikation der Versuche..... | 65 |
| 5.2.2 | Traglast | 66 |
| 5.2.3 | Querkraftverteilung..... | 67 |
| 5.2.4 | Lage des Momentennullpunkts..... | 72 |
| 5.3 | Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen | 74 |
| 5.3.1 | Voruntersuchungen..... | 74 |
| 5.3.2 | Parameterstudie..... | 78 |
| 5.3.3 | Auswertung der Finite Elemente Berechnungen | 80 |
| 5.3.3.1 | Übersicht der Ergebnisse..... | 80 |
| 5.3.3.2 | Traglast..... | 82 |
| 5.3.3.3 | Querkraftverteilung | 86 |
| 5.3.3.4 | Lage des Momentennullpunktes im Steg | 93 |
| 5.3.3.5 | Untersuchung des Einflusses der Aufhängebewehrung | 95 |
| 5.4 | Spannbetonträger – Voruntersuchungen | 97 |
| 5.4.1 | Modellierung des Spanngliedes | 97 |
| 5.4.2 | Versuchsreihe von Warwaruk..... | 98 |
| 5.5 | Spannbetonträger mit Einzelöffnungen | 100 |
| 5.5.1 | Systemeingabe | 100 |
| 5.5.2 | Auswertung der Finite Elemente Berechnungen | 101 |
| 5.5.3 | Vergleich des Tragverhaltens von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen.... | 106 |

| | | |
|------------------|---|------------|
| 5.6 | Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen | 106 |
| 5.6.1 | Systemeingabe | 106 |
| 5.6.2 | Auswertung der Finite Elemente Berechnungen..... | 107 |
| 5.6.2.1 | Übersicht | 107 |
| 5.6.2.2 | Traglast..... | 109 |
| 5.6.2.3 | Querkraftverteilung | 112 |
| 5.6.2.4 | Aufhängebewehrung..... | 115 |
| 5.7 | Anforderungen an das Ingenieurmodell im Grenzzustand der Tragfähigkeit..... | 116 |
| 5.8 | Untersuchung der Durchbiegung | 117 |
| 5.8.1 | Vorbemerkungen..... | 117 |
| 5.8.2 | Modellierung..... | 117 |
| 5.8.3 | Verifikation der Versuchsträger von Mansur | 122 |
| 5.8.4 | Parameterstudie | 123 |
| | | |
| KAPITEL 6 | ENTWICKLUNG EINES INGENIEURMODELLS ZUR BEMESSUNG VON STAHLBETON- UND SPANNBETONTRÄGERN MIT ÖFFNUNGEN | 129 |
| 6.1 | Allgemeines..... | 129 |
| 6.2 | Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit..... | 129 |
| 6.2.1 | Vorgehensweise | 129 |
| 6.2.2 | M-N-Interaktionsdiagramme | 132 |
| 6.3 | Bestimmung der Querkraftverteilung | 134 |
| 6.3.1 | Einteilung in Lastbereiche | 134 |
| 6.3.2 | Effektive Steifigkeiten in den Gurten | 136 |
| 6.3.2.1 | Vorschläge aus der Literatur zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit im Zuggurt. | 136 |
| 6.3.2.2 | Vorschläge aus der Literatur zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit im Druckgurt... | 137 |
| 6.3.2.3 | Untersuchungen zur effektiven Steifigkeit..... | 139 |
| 6.3.3 | Berechnung der effektiven Steifigkeiten für die einzelnen Lastbereiche | 143 |
| 6.3.3.1 | Vorbemerkungen | 143 |
| 6.3.3.2 | Lastbereich 1 | 143 |
| 6.3.3.3 | Lastbereich 2 | 145 |
| 6.3.3.4 | Lastbereich 3 | 146 |
| 6.3.4 | Verifizierung des vereinfachten Bemessungskonzeptes | 148 |

| | | |
|------------------|--|------------|
| 6.4 | Besonderheiten bei der Bemessung von Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen..... | 155 |
| 6.4.1 | Grenzöffnungsabstände | 155 |
| 6.4.2 | Lage des Momentennullpunktes in den Pfosten | 156 |
| 6.4.3 | Beanspruchung der Pfosten | 159 |
| 6.5 | Besonderheiten bei der Bemessung von Spannbetonträgern mit Öffnungen..... | 161 |
| 6.5.1 | Vorbemerkungen | 161 |
| 6.5.2 | Ermittlung der erforderlichen Aufhängebewehrung infolge einer Normalkraft | 161 |
| 6.6 | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit..... | 166 |
| 6.6.1 | Berechnung der Durchbiegung | 166 |
| 6.6.2 | Beschränkung der Rissbreite | 168 |
| 6.7 | Bauliche Durchbildung | 169 |
| 6.7.1 | Lastabtragung bei Trägern mit Öffnungen..... | 169 |
| 6.7.2 | Bestimmung der erforderlichen Aufhängebewehrung | 171 |
| 6.7.3 | Wahl des Spanngliedverlaufs bei Trägern mit Öffnungen..... | 172 |
| | | |
| KAPITEL 7 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | 173 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 173 |
| 7.2 | Ausblick..... | 175 |
| | | |
| ANHANG A | STAND DER FORSCHUNG | 187 |
| | | |
| ANHANG B | NUMERISCHE BERECHNUNGEN | 192 |
| | | |
| ANHANG C | M-N-INTERAKTIONSDIAGRAMME NACH DIN 1045-1 | 200 |
| | | |
| ANHANG D | ZAHLENBEISPIEL | 213 |

Bezeichnungen und Abkürzungen

Die hier aufgeführten Bezeichnungen und Abkürzungen werden in dieser Arbeit weitestgehend verwendet. An dieser Stelle nicht verzeichnete Symbole werden bei ihrem erstmaligen Auftreten im Text erläutert.

Normen:

| | |
|-------------------|---|
| DIN 1045-1 | Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Juli 2001. |
| DIN 1045-2 | Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität , Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Juli 2001, Berichtigung Juni 2002. |
| DIN EN 206-1 | Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Juli 2001. |
| DIN 1048, Teil 5: | Prüfverfahren für Beton, Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper, Juni 1991. |

Kleine lateinische Buchstaben:

| | |
|-------|--|
| a | Abstand der Öffnung zum Auflager |
| b | Breite des Querschnitts |
| b_w | wirksame Balkenbreite |
| d | statische Höhe |
| e | Exzentrizität |
| f_y | Fließgrenze des Bewehrungsstahls |
| h | Höhe des Querschnitts |
| h_0 | Höhe der Öffnung |
| h_p | Abstand der Schwerpunkte der Öffnungsgurte |

| | |
|------------|--|
| l_e | effektive Länge der Öffnung |
| l_0 | Länge der Öffnung |
| n | Verhältnis der E-Moduli E_s/E_c |
| n_c | bezogene Normalkraft im Druckgurt |
| n_t | bezogene Normalkraft im Zuggurt |
| s | Bügelabstand |
| w | Rissbreite |
| x | Druckzonenhöhe |
| x_p | Pfostenbreite zwischen benachbarten Öffnungen |
| x_c, x_t | Länge der Druckzone bzw. Zugzone infolge einer Vorspannung |
| u_{buc} | Querbewehrungsabstand |
| w | Durchbiegung |
| z | Hebelarm der inneren Kräfte |
| z_p | Lage des Momentennullpunktes im Pfosten |

Große lateinische Buchstaben:

| | |
|------------|---|
| A_s | Biegezugbewehrung |
| A_{sH1} | vertikal angeordnete Aufhängebewehrung seitlich der Öffnung |
| A_{sH2} | zusätzliche vertikal angeordnete Aufhängebewehrung seitlich der Öffnung |
| A_{sD} | diagonal angeordnete Aufhängebewehrung seitlich der Öffnung |
| $C3, C4$ | Fließgelenkorte im Druckgurt |
| EI_{eff} | effektive Steifigkeit |
| G_c | Druckbruchenergie |
| G_f | Zugbruchenergie |
| H_p | horizontale Kraft im Pfosten |
| I | Flächenträgheitsmoment Gesamtquerschnitt |
| I_1 | Flächenträgheitsmoment im Zustand 1 |
| I_i | ideelles Flächenträgheitsmoment |
| l | Stützweite des Trägers |
| M | globales Biegemoment |
| MCFT | Modified Compression Field Theory |
| S | Schubkonzentrationsfaktor |
| $T1, T2$ | Fließgelenkorte im Zuggurt |

| | |
|-------------------|------------------------------------|
| V | Querkraft |
| V_R | aufnehmbare Querkraft |
| V_{tot} | gesamte Querkraft in Öffnungsmitte |
| Z_{AsH1} | Zugkraft in der Aufhängebewehrung |
| Z_s | Zugkraft im Bewehrungsstahl |

Griechische Buchstaben:

| | |
|--------------------------------|--|
| β | Schubreduktionsfaktor |
| χ | Abminderungsbeiwert zur Bestimmung der effektiven Biegesteifigkeit |
| ε_c | Betondehnung |
| $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ | Dehnung in x- und y-Richtung |
| ζ | z/d: Beiwert für den Hebelarm der inneren Kräfte |
| η | Verhältnis von M/V [m] |
| θ | Druckstrebenneigungswinkel |
| μ_{bue} | Bügel-/Querbewehrungsgrad |
| μ_o | Bewehrungsgrad im Obergurt |
| μ_u | Bewehrungsgrad im Untergurt |
| ν | Querdehnzahl |
| ξ | x/d: Beiwert der Druckzonenhöhe |

Indizes:

| | |
|-----------|-------------------------------------|
| Index c | Druckgurt |
| Index cr | Rissschnittgröße |
| Index sek | Schnittgrößen am Sekundärsystem |
| Index t | Zuggurt |
| Index u | maximal aufnehmbare Belastung (ULS) |

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

In Gebäuden werden häufig Unterzugsdeckensysteme eingesetzt. Zur Durchführung von Installationsleitungen werden die Stahlbeton- und Spannbetonunterzüge durch Öffnungen geschwächt. Diese Öffnungen beeinflussen das Trag- und Verformungsverhalten der Unterzüge nachhaltig. Die vorhandenen Bemessungskonzepte zu diesem häufig auftretenden Problem widersprechen sich teilweise grundsätzlich. Wesentliche Fragestellungen, beispielsweise die Querkraftverteilung auf die Gurte oder die Ausbildung der Stege zwischen zwei Öffnungen, werden unzureichend behandelt.

Die Notwendigkeit, ein umfassendes und abgesichertes Bemessungskonzept für Stahlbeton- und Spannbetonträger auch mit mehreren Öffnungen zu entwickeln, wird in einem von Hauri [HAU94] verfassten Fachbeitrag deutlich. In diesem beschreibt Hauri den Schadensfall von über 40 vorgespannten Trägern mit jeweils 13 kreisrunden Öffnungen. An den eingebauten Trägern bildeten sich zwischen den Öffnungen große Schubrisse (siehe Abbildung 1.1). Gleichzeitig entstand eine horizontale Verschiebung zwischen Ober- und Untergurt. Sämtliche vorhandenen Träger mussten saniert und nachträglich verstärkt werden. Zur Klärung des Schadenfalls wurden ein Kleinversuch und ein maßstabsgetreuer Großversuch durchgeführt. Infolge der Schubverformungen wurde eine dem Momentenverlauf entgegengesetzte Durchbiegung beobachtet.

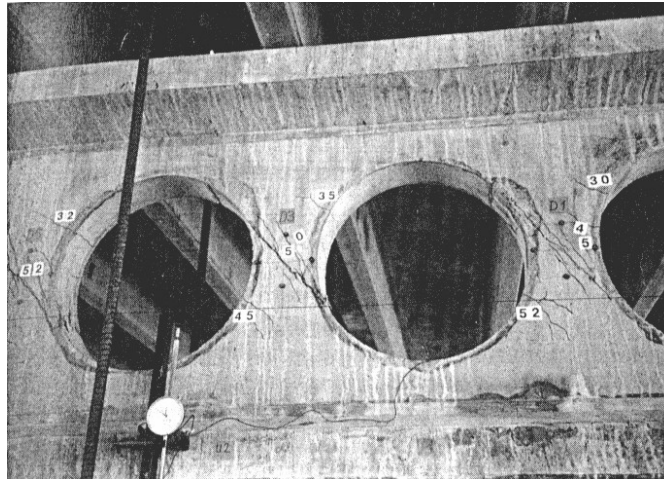


Abbildung 1.1: Ausbildung von Schubrisen zwischen den Öffnungen [HAU94]

Der vorgestellte Schadensfall verdeutlicht, dass die Versagenslast maßgeblich von der Ausbildung der Stege bestimmt wird. Die Kenntnis über den inneren Schnittgrößenverlauf ist daher notwendig. Zur Bemessung des Steges wird die Horizontalkraft H_p sowie die Lage des Momentennullpunktes im Steg benötigt (siehe Abbildung 1.2), um die maximale Beanspruchung des Steges zu ermitteln.

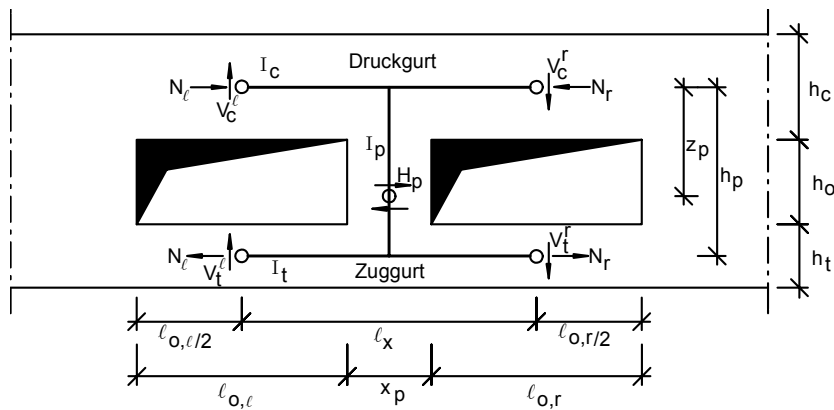


Abbildung 1.2: Kräfte im Öffnungsbereich

Neben der Bemessung der Stege ist auch die Ausbildung der Gurte entscheidend. Hierfür ist die Verteilung der globalen Querkraft auf den Druck- und Zuggurt zu bestimmen. Durch die Querkraften in den Gurten werden Sekundärmomente erzeugt. Zur Bestimmung der Hebelarme muss die Lage des Nullpunktes der Sekundärmomente bekannt sein.

1.2 Ziel und Inhalt der Arbeit

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines umfassenden und abgesicherten Bemessungskonzeptes für Stahlbeton- und Spannbetonträger mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen. Umfangreiche Finite Elemente Berechnungen unter Verwendung von physikalisch nichtlinearen Werkstoffgesetzen sowie eine effiziente Versuchsserie mit einem innovativen Versuchsaufbau dienen als Grundlage für das zu entwickelnde Bemessungskonzept. Neben der Einhaltung der Tragfähigkeit gilt es, im gleichen Maße die Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen. Unter Berücksichtigung der maßgebenden Einflussgrößen soll im Rahmen dieser Arbeit ein Bemessungskonzept erarbeitet werden, das eine einfache wie auch zuverlässige Handhabung erlaubt. Basis für die Entwicklung eines allgemeingültigen Bemessungskonzeptes ist die Klärung nachfolgend aufgeführter Fragestellungen:

- Wie wirken sich der Abstand und die Anzahl der Öffnungen auf das Trag- und Verformungsverhalten aus?
- Ab welchem Abstand beeinflussen sich zwei benachbarte Öffnungen nicht mehr gegenseitig im Trag- und Verformungsverhalten?
- Ab welchem Abstand verhält sich eine Öffnungsgruppe wie eine einzige große Öffnung?
- Welche Beanspruchung erfahren die Stege zwischen den Öffnungen und wie groß ist diese?
- Wie wirkt sich Wahl und Anordnung der Bewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten aus?
- Welchen Einfluss besitzen Größe und Geometrie der Öffnungen auf die Traglast und die Gebrauchstauglichkeit?
- Können die Erkenntnisse an Trägern mit einer Öffnung auf Träger mit Öffnungsgruppen im Hinblick auf die Verteilung der Querkraft übertragen werden?
- Welche Unterschiede ergeben sich im Trag- und Verformungsverhalten bei Spannbetonträgern im Vergleich zu Stahlbetonträgern?

Sämtliche Einflussfaktoren sind durch experimentelle und numerische Untersuchungen zu erfassen. Hierzu sind folgende Parameter zu untersuchen:

- Größe der Öffnungen
- Geometrie der Öffnungen
- Lage der Öffnungen in horizontaler und vertikaler Richtung
- Anzahl der Öffnungen
- Abstand der Öffnungen untereinander
- Bewehrungsmenge und -anordnung in den Öffnungsgurten und in den Pfosten zwischen benachbarten Öffnungen
- Anordnung einer Aufhängebewehrung seitlich der Öffnungen
- Größe und Anordnung einer Vorspannung

Die Lage der Öffnungen in Längsrichtung kann bei Einfeldträgern, die durch eine Einzellast belastet werden, auch über das in Öffnungsmitte vorherrschende Schnittgrößenverhältnis (M/V-Verhältnis) ausgedrückt werden.

Für Abbildung 1.3 gelten folgende M/V-Verhältnisse:

$$\text{Öffnung 1} \quad \frac{M}{V} = a_1 + \frac{l_{0,1}}{2} \quad (1.1)$$

$$\text{Öffnung 2} \quad \frac{M}{V} = a_2 + \frac{l_{0,2}}{2} \quad (1.2)$$

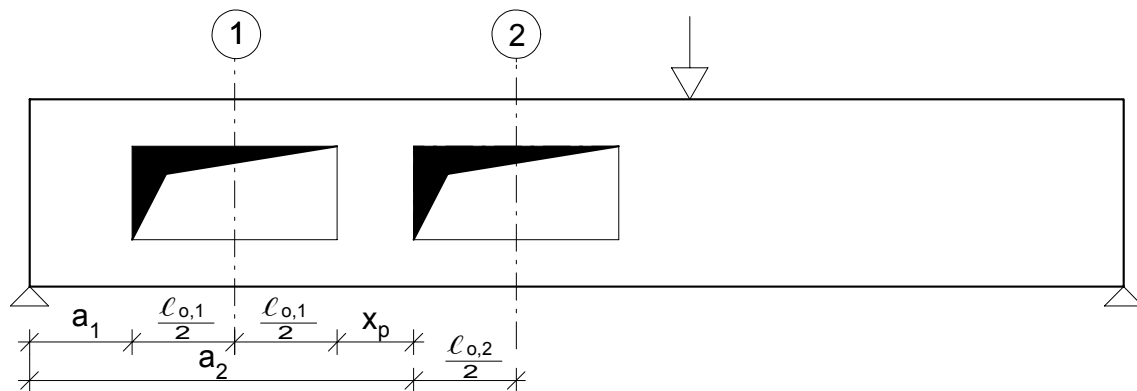


Abbildung 1.3: Lage der Öffnungen

Im Folgenden werden zunächst die bereits vorhandenen Bemessungskonzepte gegenübergestellt und bewertet. Zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsserie ausgewertet und in

Kapitel 5.2 mit nichtlinearen Finite Elemente Berechnungen verifiziert. Nach einer kurzen Darstellung der Grundlagen der Finite Elemente Methode erfolgt eine umfangreiche Parameterstudie. Hierbei wird das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen untersucht. Aufbauend auf den Ergebnissen der experimentellen und numerischen Untersuchungen wird das entwickelte Ingenieurmodell zur Bemessung von geschwächten Trägern vorgestellt.

Kapitel 2

Stand der Forschung

2.1 Vorbemerkungen

Im Folgenden werden die bereits durchgeführten Versuche und Bemessungskonzepte diverser Forscher vorgestellt. Unterschieden wird hierbei zwischen Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen sowie Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen.

2.2 Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen

2.2.1 Versuche an Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen

In [EHM02] wurde eine Datenbank über Versuchsserien an Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen erstellt. Hierbei handelt es sich um die Versuchsserien von:

- Lorentsen [LOR62]
- Nasser et al. [NAS67]
- Hanson [HAN69]
- Mansur, Tan [MATA99]
- Wagner [WAG86, WAG87]
- Lee [LEE89]

2.2.2 Bemessungskonzepte für Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen

2.2.2.1 Bemessungskonzept nach Ehmann

In dem Konzept nach Ehmann [EHM02; SCEH02, ENS01] bildet die Bestimmung der Querkraftverteilung auf die Gurte die Grundlage der Bemessung. Auf der Basis der Ergebnisse der durchgeführten FE-Berechnungen konnte der Verlauf der Querkraftverteilung, aufgeteilt nach charakteristischen Lastbereichen entsprechend Abbildung 2.1, bestimmt werden.

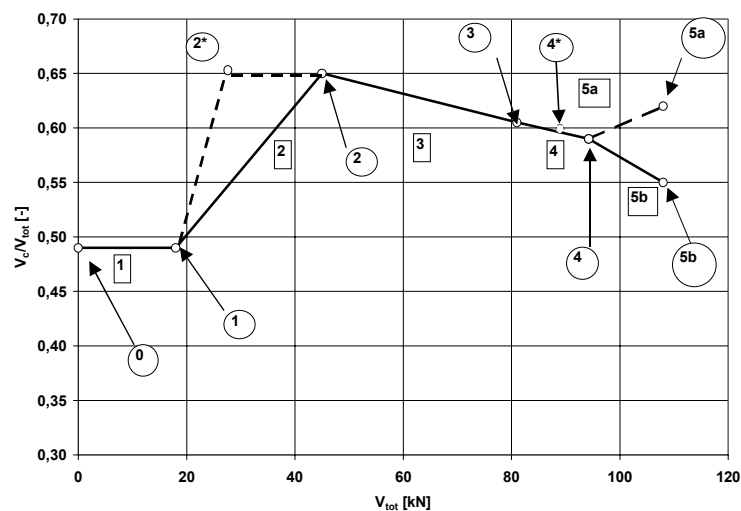


Abbildung 2.1: Verlauf der Querkraftverteilung nach charakteristischen Lastbereichen [EHM02]

Im ersten Lastbereich sind Druck- und Zuggurt noch ungerissen, so dass sich die Querkraft im Verhältnis der ideellen Biegesteifigkeiten auf die Öffnungsgurte verteilt. Als Kriterium für die Rissbildung wird die Überschreitung der Biegezugfestigkeit in den Gurtanschnitten festgelegt. Zur Berücksichtigung des Spannungsgradienten auf die Biegezugfestigkeit wurde eine Beziehung in Abhängigkeit der Beanspruchung aus Normalkraft und Sekundärmoment entwickelt. Der Lastbereich 2 beginnt mit dem Aufreißen des Zuggurtes (Punkt 1) und endet mit dem Aufreißen des Druckgurtes (Punkt 2). Der Verlauf der Querkraftverteilung ist in diesem Bereich durch den starken Steifigkeitsabfall des Zuggurtes gekennzeichnet, so dass die gesamte, zusätzlich aufgebrachte Querkraft vom Druckgurt allein aufgenommen wird. Das Aufreißen des Druckgurtes in einem der Gurtanschnitte (Punkt 2) leitet den Lastbereich 3 ein. Dieser endet bei Erreichen der Traglast unter Berücksichtigung der Verschiebung des

Nulldurchgangs der Sekundärmomente (Punkt 4*). Die Traglast wird entweder durch die Entstehung des ersten Fließgelenkes an einem Ende der Öffnungsgurte oder durch ein globales Biegeversagen infolge von Fließen beider Bewehrungslagen des Zuggurtes gekennzeichnet. Das Verhältnis der Querkraftanteile der beiden Öffnungsgurte wird durch das Verhältnis der Biegesteifigkeiten der Gurte zueinander innerhalb dieses Lastbereiches bestimmt. Die effektive Biegesteifigkeit der Gurte kann mit Hilfe des Allgemeinen Bemessungsdiagramms für den Bruchzustand unter Berücksichtigung des Mittelwertes der Betondruckfestigkeit abgeschätzt werden. Im Lastbereich 4 und 5 entstehen weitere Fließgelenke, bis sich eine kinematische Kette ausbildet. Aufgrund der großen Verformungen werden diese Lastbereiche bei der Bemessung vernachlässigt. Eine veränderte Rissabfolge kann sich bei Trägern mit großer Biegebeanspruchung (in der Regel $|M/V| > 1,0 \text{ m}$) einstellen. Infolge der hohen Zugnormalkraft kommt es hier zu Trennrissen im Zuggurt, bevor Risse in den Öffnungsecken des Druckgurtes entstehen. Nachdem der Zuggurt zentrisch aufgerissen ist, ändern sich die Steifigkeiten beider Gurte solange nicht, bis der Druckgurt im Gurtanschnitt aufreißt oder sich das erste Fließgelenk bildet.

Die Lage des Momentennullpunktes berechnet sich in Abhängigkeit der Öffnungslänge, des M/V -Verhältnisses und der Längsbewehrung in den Gurten. Für rechteckige Einzelöffnungen sind eine Grenzöffnungslänge und eine Grenzöffnungshöhe festgelegt worden. Werden diese Grenzen unterschritten, besitzt die Öffnung keinen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten des Stahlbetonträgers und kann somit vernachlässigt werden.

Die Biegebemessung erfolgt mit Hilfe von M - N -Interaktionsdiagrammen für unsymmetrisch bewehrte Druck- und Zuggurte. Ergänzend werden zur Sicherung der Trag- und Gebrauchsfähigkeit Empfehlungen zur baulichen Durchbildung gegeben. Die Aufhängebewehrung direkt neben der Öffnung wird dimensioniert und durch eine zweite Aufhängebewehrung in einem definierten Abstand ergänzt. Zur Beschränkung der Rissbreite sollte zusätzlich Diagonalbewehrung in den Öffnungsecken angeordnet werden.

Dieser Bemessungsvorschlag wurde auf der Basis von nichtlinearen FE-Berechnungen für Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen entwickelt. Eine zusätzlich wirkende Normalkraft infolge äußerer Lasten oder Vorspannung wird nicht berücksichtigt. Auch gibt es kein Konzept zur Bemessung von Trägern mit Öffnungsgruppen.

2.2.2.2 Bemessungskonzept nach Mansur und Tan

Nach dem Bemessungskonzept von Mansur und Tan [MATA99; TAN82; MAN88] versagt ein Stahlbetonträger mit Öffnung durch das Bilden einer kinematischen Kette (vgl. Abbildung 2.2). In den Gurtanschnitten entstehen vier Fließgelenke. Voraussetzung für diesen Versagensmechanismus ist eine ausreichende Querkrafttragfähigkeit und Duktilität der Gurte. Ein Stabilitätsversagen der Gurte ist auszuschließen.

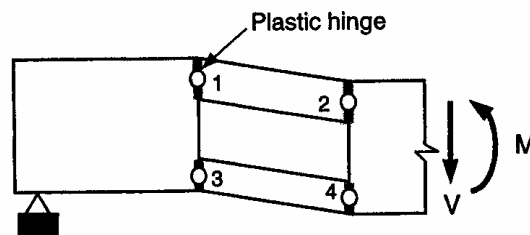


Abbildung 2.2: Ausbildung der kinematischen Kette [MATA99]

Um die aufnehmbaren Schnittgrößen in jeder Öffnungsecke zu bestimmen, muss ein M-N-Interaktionsdiagramm erstellt werden (vgl. Abbildung 2.3). Anschließend werden die Querkraften in den Gurten berechnet. Stimmt die Summe der Querkraften in den Gurten nicht mit der vorhandenen Gesamtquerkraft überein, ist die Bewehrung iterativ anzupassen. Die Bereiche unmittelbar neben der Öffnung werden jedoch kaum betrachtet.

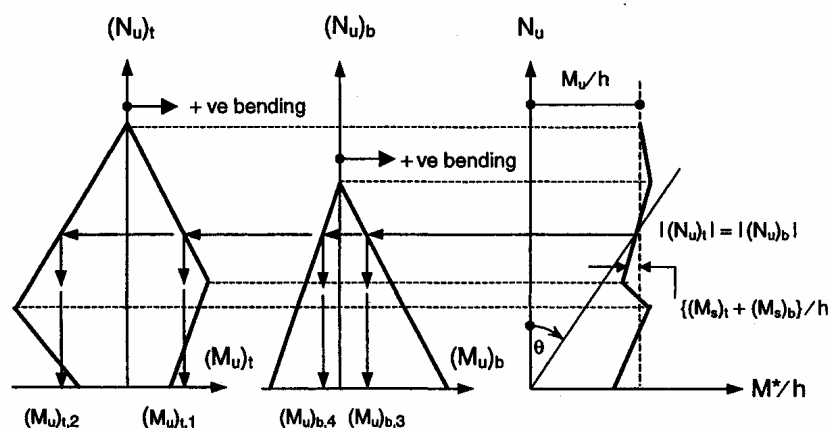


Abbildung 2.3: Interaktionsdiagramme zur Bestimmung der Momente in den Gurtanschnitten [MATA99]

2.2.2.3 Bemessungskonzept nach Schlaich und Schäfer

Schlaich und Schäfer [SCSC98] teilen einen Träger mit Öffnung in B- und D-Bereiche ein. In den D-Bereichen ist die Bernoulli-Hypothese nicht mehr erfüllt. Zur Bestimmung des Kräfteflusses wurden Stabwerkmodelle entwickelt. Der Vorteil dieses Konzeptes liegt darin, dass für den jeweiligen Träger ein geeignetes Stabwerkmodell entwickelt werden kann. Voraussetzung ist Erfahrung im Modellieren von Stabwerkmodellen. Der zeitliche Aufwand kann mitunter sehr hoch sein.

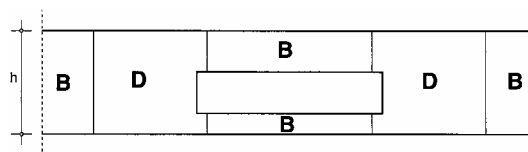


Abbildung 2.4: Unterteilung eines Trägers mit Öffnung in B- und D-Bereiche

2.2.2.4 Bemessungskonzept nach Hottmann et al.

Hottmann et al. [HOSC96] entwickelten das Konzept von Schlaich und Schäfer weiter. Zunächst werden die Schnittgrößen im Bereich der Öffnung bestimmt. Die Verteilung der Querkräfte ist innerhalb vernünftiger Grenzen frei wählbar, da in Versuchen gezeigt wurde, dass die Träger „gutmütig“ auf die Querkraftverteilung reagieren. Die Lage des Momentennullpunktes wird durch eine statisch unbestimmte Berechnung im Zustand I ermittelt. Die Tragfähigkeit der Öffnungsgurte ist vorab nachzuweisen. Zur Bemessung der D-Bereiche an den Öffnungsanschnitten stehen drei Modelle zur Verfügung:

- Getrenntes Modell
- Modell A
- Modell B

Bei dem getrennten Modell werden Querkraft, Moment (siehe Abbildung 2.5) und Normalkraft (siehe Abbildung 2.6) unabhängig voneinander betrachtet. Eine vollkommene Trennung der Querkraft und des Moments ist jedoch nicht möglich, da beide Schnittgrößen in den Gurten Sekundärmomente erzeugen.

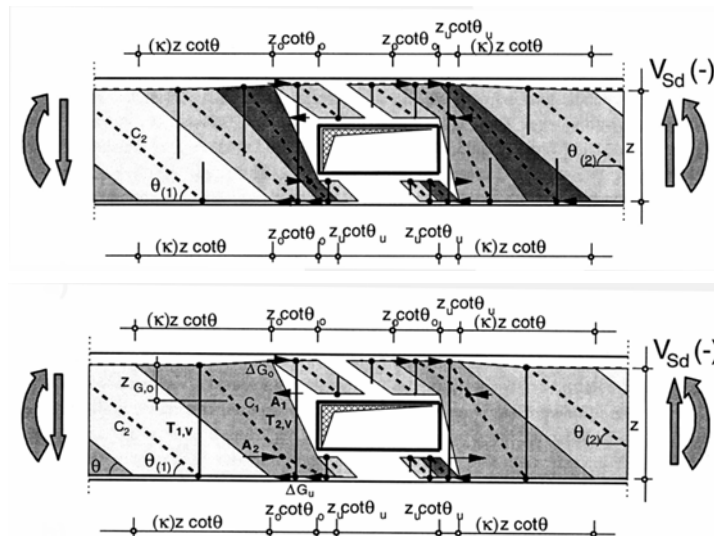


Abbildung 2.5: Teilmodelle für Querkraft und Moment [HOSC96]

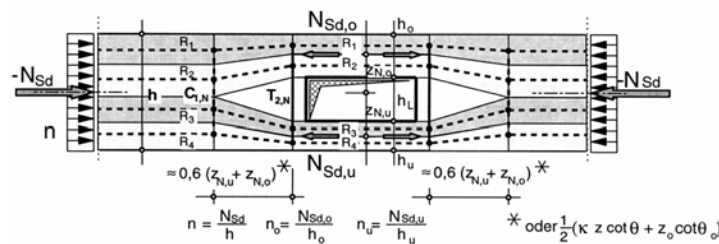


Abbildung 2.6: Teilmodell für Normalkraft [HOSC96]

Das getrennte Modell gibt auf der sicheren Seite liegend lediglich einen Überblick über den Ausnutzungsgrad des Betons im Öffnungsbereich. Jedoch ist dieses Modell inkompatibel mit den Versagensmechanismen, die in Versuchen beobachtet wurden. Bei den Versuchsträgern bildeten sich in Bereichen Risse, in denen im Modell Druckstreben verlaufen. Um diese Diskrepanz zu beheben, entwickelten Hottmann et al. die Modelle A und B, die den beobachteten Versagensmechanismen in den Versuchen entsprachen. Die auftretenden Schnittgrößen wurden hierbei gleichzeitig abgetragen.

Das Modell A basiert auf der Annahme, dass die Zug- und Druckkräfte der Gurte durch Abwinklungen der letzten Druckstrebe vor der Öffnung in den D-Bereich geleitet werden (siehe Abbildung 2.7). Dieses Modell ist kinematisch, so dass jede Schnittgrößenkombination ihre eigene Modellgeometrie benötigt. Aufgrund der iterativen Modellfindung besitzt dieses Modell einen sehr hohen Rechenaufwand.

Zudem wurde bei FE-Berechnungen festgestellt, dass die Druckstrebe C1 teilweise nicht ausgebildet wird.

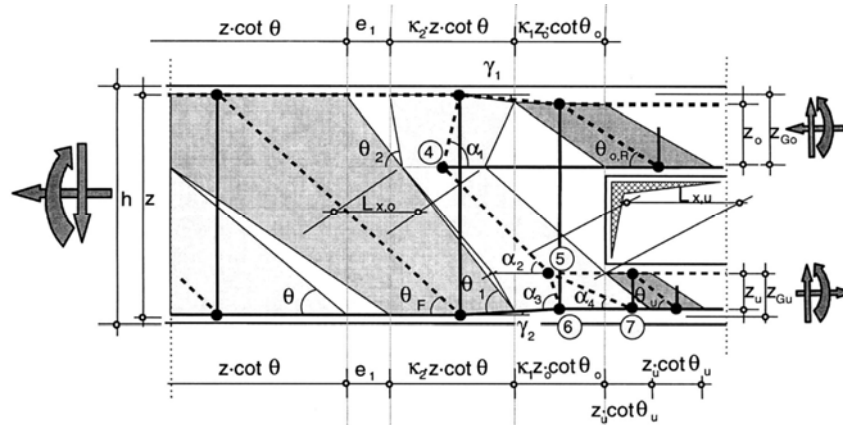


Abbildung 2.7: Fachwerkmodell A im Bereich vor der Öffnung [HOSC96]

Im Modell B (siehe Abbildung 2.8) wird daher kein direktes Druckfeld vom Zugstab A1 zum Obergurt angenommen. Das Modell B ist im Gegensatz zu Modell A nicht kinematisch, sondern statisch bestimmt. Somit kann eine beliebige Schnittgrößenkombination ohne Änderung der Geometrie abgetragen werden. Anstelle des schrägen Druckfeldes zum Obergurt wird ein vertikaler Zugstab zum Untergurt angenommen.

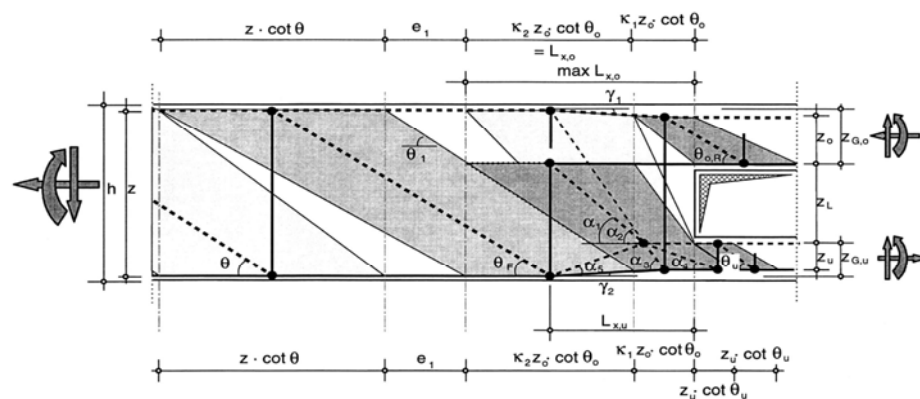


Abbildung 2.8: Fachwerkmodell B im Bereich vor der Öffnung [HOSC96]

Aufgrund der fehlenden Kinematik ist das Modell B im Vergleich zu Modell A weniger flexibel. Eine passende Modellfindung gestaltet sich vor allem bei großen negativen Momenten am Öffnungsrand problematisch.

2.2.2.5 Bemessungskonzept nach Leonhardt

Leonhardt [LEO77a] weist im Zustand II pauschal dem Druckgurt 80 bis 90 % der Querkraft zu. Vereinfachend wird der Momentennullpunkt in Öffnungsmitte gesetzt. Das Bemessungskonzept basiert auf Versuchen von Nasser aus den sechziger Jahren [NAS67].

2.2.2.6 Bemessungskonzept nach Elgehausen und Gerster

Elgehausen und Gerster [ELGE93] geben Fachwerkmodelle zur Abtragung von Moment, Querkraft und Normalkraft an. Die Querkraft verteilt sich in Abhängigkeit der Biegesteifigkeiten der Gurte nach DAfStb-Heft 240 [GRTH91]. Die Steifigkeiten ermitteln sich in Abhängigkeit von der einwirkenden Querkraft sowie vom Bewehrungsgrad, der vor der Berechnung bekannt sein muss und ggf. iterativ zu verändern ist.

2.2.2.7 Bemessungskonzept nach Wommelsdorff

In der aktuellen Ausgabe beinhaltet das Konzept nach Wommelsdorff [WOM03] die Konzepte nach Schnellenbach-Held und Ehmann [SCEH02; EHM02] sowie nach Schlaich und Schäfer [SCSC98] in Bezug auf die Querkraftverteilung und die Lage des Momentennullpunktes.

2.2.3 Ermittlung der Durchbiegung von Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen

Nach Ehmann [EHM02] ist die Durchbiegung von Trägern mit Einzelöffnungen maßgeblich von der Öffnungsgeometrie abhängig. Auf Basis von nichtlinearen FE-Berechnungen wurde eine Formel zur Bestimmung der Durchbiegung ermittelt. In Kapitel 2.3.3 sind weitere Konzepte zur Durchbiegung von Trägern mit Öffnungsgruppen aufgeführt. Diese Konzepte können auch zur Berechnung der Durchbiegung von Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen herangezogen werden.

2.3 Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen

2.3.1 Versuche an Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen

Eine Übersicht über die bislang durchgeführten Versuche an Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen ist in Anhang A Tabelle A.1 gegeben. Hierbei werden die Anzahl und der Querschnittstyp der Versuchsträger, die Öffnungsanzahl und das Verhältnis von Öffnungshöhe zu Trägerhöhe sowie die Stegbreite zwischen zwei benachbarten Öffnungen angegeben. Es wird zwischen kreisrunden, quadratischen und rechteckigen Öffnungsformen unterschieden. Die Entfernung der ersten Öffnung zum Auflager wird für Einzellasten über das vorherrschende Schnittgrößenverhältnis (Moment zu Querkraft) in Öffnungsmitte ausgedrückt. Aufgelistet sind weiterhin die variierten Parameter innerhalb einer Versuchsserie, die Versagensart sowie die wichtigsten Erkenntnisse, welche die Forscher aus den Versuchsergebnissen gewonnen haben. Somit wird ersichtlich, welche Bereiche versuchstechnisch bisher noch nicht oder nur unzureichend abgedeckt wurden.

Die größte Versuchsserie mit 54 Stahlbetonbalken führte Wagner [WAG86; WAG87] 1987 in der damaligen DDR durch. Die Versuchsträger besaßen zwei Öffnungsgruppen mit jeweils drei kreisrunden Öffnungen, welche unmittelbar neben dem Auflager angeordnet wurden. In diesem Bereich bildet sich ein zusätzlicher Diskontinuitätsbereich (D-Bereich) aus, so dass die Ergebnisse im Auflagerbereich im Hinblick auf eine Beeinflussung der D-Bereiche überprüft werden müssen. Angaben zum Durchbiegungsverhalten der Versuchsträger fehlen.

Im Jahr 1974 wurden von Somes und Corley [SOCO74] drei Versuche an Leichtbetonbalken mit zwei Gruppen von jeweils drei kreisförmigen Öffnungen durchgeführt. 1985 führte Twelmeier [TDF85] drei Versuche an Stahlbetonbalken mit zwei Gruppen von jeweils drei kreisrunden Öffnungen durch. Aus versuchstechnischen Gründen konnte nur einer der drei Versuche zur Untersuchung des Tragverhaltens von Trägern mit Öffnungsgruppen herangezogen werden. So konnten die Querkraftverteilung auf die Gurte und die Bestimmung des Momenten-Nulldurchgangs in den Gurten nur eingeschränkt festgestellt werden. Tan und Mansur [TMH96; MHL93; MATA99] testeten lediglich einen Träger mit Plattenbalkenquerschnitt, der durch zwei rechteckige Öffnungen pro Feld geschwächt war. Die Versuchsserien, die bis heute durchgeführt wurden, besitzen bis auf die Versuchsserie von Wagner einen

sehr kleinen Umfang von maximal drei Versuchskörpern, so dass keine genügend abgesicherten Bemessungsvorschläge aus den vorhandenen Versuchsergebnissen entwickelt werden können.

2.3.2 Bemessungskonzepte für Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen

In Anhang A Tabelle A.2 sind sämtliche Bemessungskonzepte gegenübergestellt. Besondere Beachtung verlangt das Tragverhalten der Stege zwischen zwei benachbarten Öffnungen und die Durchbiegung der Versuchsträger mit mehreren Öffnungen. Ein durchgängiges Bemessungskonzept, das mit umfangreichen experimentellen oder numerischen Untersuchungen bestätigt wurde, ist nicht vorhanden.

An Versuchen mit einer negativen Momentenbeanspruchung stellten Somes und Corley [SOCO74] fest, dass die Traglast der drei Versuchskörper annähernd der Traglast von Trägern ohne Öffnungen entspricht, wenn die Öffnungen nicht in die Druckzone reichen. Ober- und Untergurt und die Stege zwischen den Öffnungen können laut Somes und Corley zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit als eine Einheit betrachtet werden. Ihre Erkenntnisse beschränkten sie auf Leichtbetonträger mit negativer Momentenbeanspruchung.

Nach Wagner [WAG86; WAG87] können Träger mit Öffnungen über ein Vierendeelmodell abgebildet werden. Zur Wahl der Abstände zwischen zwei Öffnungen sind keine Aussagen getroffen worden. Tan und Mansur [TMH96; MHL93; MATA99] empfehlen, die Stege zwischen zwei benachbarten Öffnungen als eine kurze, vorgespannte Stütze zu bemessen. Der Momentennullpunkt wird in der Mitte der idealisierten Stütze angenommen.

Nach Hottmann [HOSC96] können die Bereiche an den Öffnungsanschnitten mit den beschriebenen Modellen bemessen werden. Der wesentliche Einflussparameter für die Bemessung zwischen den Öffnungen ist der Öffnungsabstand, welcher die Modellwahl bestimmt.

Liegen die Öffnungen so weit auseinander, dass sich zwischen den Öffnungen je ein D-Bereich und der reguläre B-Bereich ausbildet, kann jede Öffnung getrennt voneinander behandelt werden, siehe Abbildung 2.9.

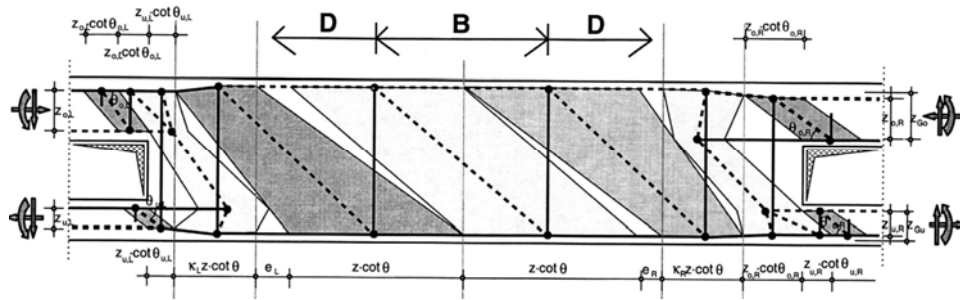


Abbildung 2.9: Fachwerkmodell für zwei Öffnungen mit großem Abstand [HOSC96]

Bei einander angrenzenden D-Bereichen ergibt sich das Fachwerkmodell aus Abbildung 2.10.

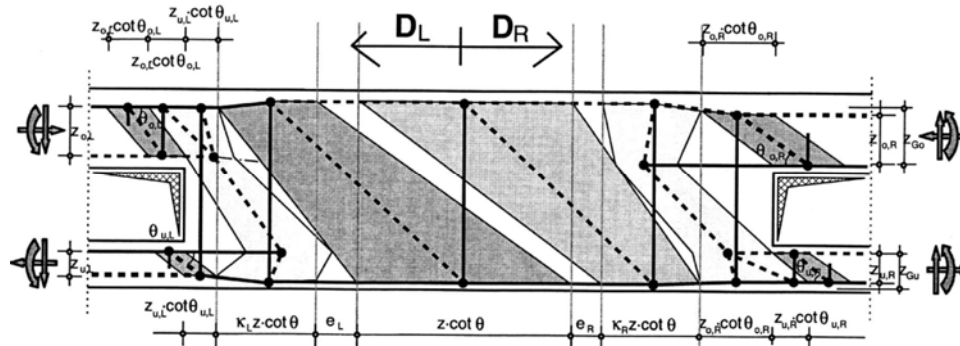


Abbildung 2.10: Berührung der beiden D-Bereiche [HOSC96]

Durch enger zusammenliegende Öffnungen gehen schließlich die D-Bereiche in einander über, es entsteht eine gemeinsame Druckstrebe (siehe Abbildung 2.11). In diesem Bereich ist eine abgeminderte Zugkraft von

$$T' = \frac{V \cdot a_m}{(z \cdot \cot \theta)^2} \quad (2.1)$$

abzudecken.

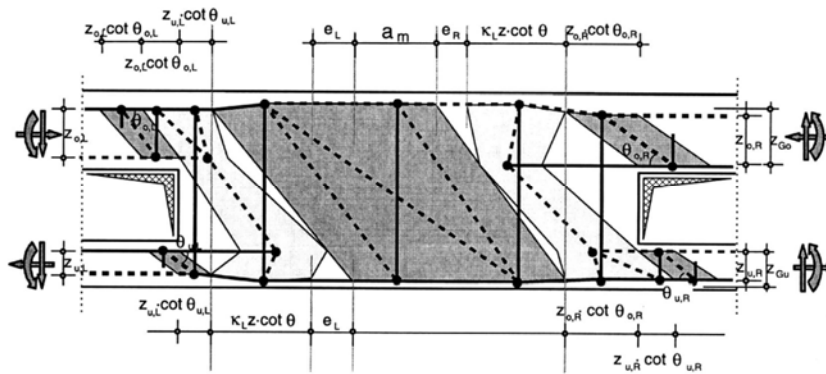


Abbildung 2.11: Überschneidung der D-Bereiche [HOSC96]

Als kleinstmöglicher Abstand zweier Öffnungen wird die Länge

$$L_{\min} = z_{u,L} \cot \theta_{u,L} + \kappa_L \cdot z \cot \theta + z_{o,R} \cot \theta_{o,R} \quad (2.2)$$

angegeben (vgl. Abbildung 2.12). Zur überschlägigen Berechnung kann $L_{\min} \approx 0,8h$ bis $1,0h$ angenommen werden.

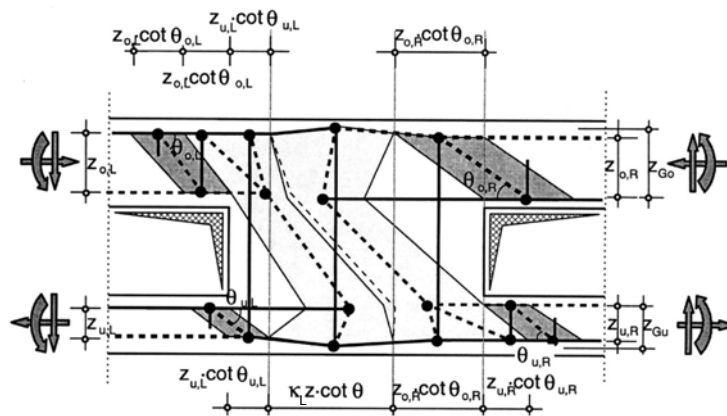


Abbildung 2.12: Kleinstmöglicher Abstand zwischen zwei Öffnungen [HOSC96]

Wird der Abstand der Öffnungen weiter verkleinert, stellt sich das Tragverhalten eines Rahmens ein. Die Verbindungen zu den Gurten der Öffnung sind wie Rahmenecken auszuführen. Zur Bemessung dieser Modelle eignen sich die Verfahren nach Jennewein [JEN89].

2.3.3 Ermittlung der Durchbiegung von Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen

In den Versuchen von Somes und Corley [SOCO74] vergrößerte sich die Durchbiegung um bis zu 64% im Vergleich zu massiven Trägern, jedoch wurden keine Hinweise zur Durchbiegungsberechnung gegeben.

In Abbildung 2.13 wurde die maximale Verschiebung für den Versuchsträger LT3 von Twelmeier [TDF85] mit einer nichtlinearen Finite Elemente Berechnung und nach dem Konzept von Mansur et al. [MATA99] bestimmt. Hierbei wurde die Anzahl der Öffnungen pro Trägerseite variiert. Es wird ersichtlich, dass nach dem Konzept von Mansur die Verformung im Vergleich zu dem Versuchsergebnis deutlich unterschätzt wird. Die FE-Berechnungen ergeben, dass sich die Durchbiegung bei steigender Anzahl der Öffnungen nur geringfügig vergrößert.

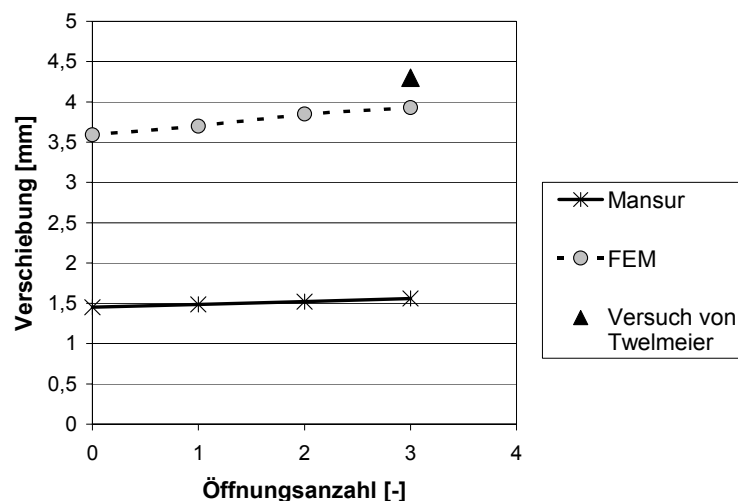


Abbildung 2.13: Maximale Verschiebung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl

Ein Konzept zur Ermittlung der Durchbiegung von Trägern mit Öffnungsgruppen wurde lediglich von Wagner [WAG87] sowie von Mansur et al. [MHL93; MATA99; MAN92] entwickelt. Nach Wagner kann die Durchbiegung entweder über abschnittsweise Integration unter Berücksichtigung der verringerten Biegesteifigkeiten der Öffnungsbereiche erfasst werden oder der Nachweis der Durchbiegung wird über die Schlankheit des Trägerfeldes geführt. Beide Methoden sind vor allem bei mehreren nebeneinander angeordneten Öffnungen sehr aufwendig und daher nicht praxistauglich.

Tan und Mansur erweiterten den Vorschlag von Barney [BHC77] für Spannbetonträger (siehe Kapitel 2.5.3) auf Stahlbetonträger mit mehreren Öffnungen, indem die Durchbiegungen der Gurte infolge der Querkräfte mit der Anzahl der Öffnungen multipliziert werden. Zur Ermittlung der Durchbiegung werden jedoch die Steifigkeiten im Zustand I eingesetzt, so dass die Durchbiegung wesentlich unterschätzt wird. Dieses Konzept wurde bisher nicht mit Versuchsergebnissen und Finite Elemente Berechnungen verifiziert.

2.4 Spannbetonträger mit Einzelöffnungen

2.4.1 Vorbemerkungen

In Anhang A Tabelle A.3 sind sämtliche durchgeführten Versuche an Spannbetonträgern sowohl mit einer Einzelöffnung als auch mit Öffnungsgruppen aufgelistet. Tabelle A.4 in Anhang A stellt die entwickelten Bemessungskonzepte vor. Zu den Fragestellungen für Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen ergeben sich neue Fragestellungen bezüglich der Querkraftverteilung auf die Gurte und der Lage des Momentennullpunktes in den Gurten.

2.4.2 Versuche an Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen

Dinakaran und Sastry [DISA84] führten 1984 neun Versuche an Spannbetonträgern mit einer rechteckigen Einzelöffnung durch. Die Öffnung lag teilweise in reinen Biegebereichen ohne Querkraftbeanspruchung, so dass die Verteilung der Querkraft auf die Gurte nicht untersucht werden konnte. Kennedy et al. [KEAB92; KEEL82] testeten acht Spannbetonträger mit einer kreisrunden Öffnung und vier Spannbetonträger mit einer rechteckigen Öffnung.

2.4.3 Bemessungskonzepte für Spannbetonträger mit Einzelöffnungen

Die meisten Forscher stimmten darin überein, dass sich ein vorgespannter Träger mit einer Öffnung wie ein Vierendeelträger verhält. Der genaue Punkt des Momenten-Nulldurchgangs ist jedoch von keinem bestimmt worden. Näherungsweise wird dieser in der Mitte der Gurte angenommen. Für die Querkraftverteilung auf Ober- und

Untergurt sind verschiedene Vorschläge erarbeitet worden. Nach Dinakaran et al. [DISA84] verteilt sich die Querkraft über das Verhältnis der Gurtflächen, während sowohl Barney et al. [BHC77] als auch Mansur [MATA99] eine Verteilung in Abhängigkeit der Gurtsteifigkeiten vorschlugen. Kennedy und Abdalla [ABKE95] entwickelten eine Kombination aus beiden Konzepten. Es bleibt zu überprüfen, welche Methode das reale Verhalten am ehesten wiedergibt.

Das Bemessungskonzept für Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen wird von [MATA99] auf vorgespannte Träger übertragen. Bevor im Zuggurt Risse entstehen, verteilt sich die Querkraft in Abhängigkeit der Gurtsteifigkeiten. Nach der Rissbildung übernimmt der Druckgurt die gesamte Querkraft. Die Richtigkeit einer Übertragung des Versagensmechanismus auf Spannbetonträger mit einer Einzelöffnung oder mehreren Öffnungen ist bisher nicht überprüft.

2.4.4 Ermittlung der Durchbiegung von Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen

Aufgrund der Vorspannung ergeben sich bei Spannbetonträgern im Vergleich zu Stahlbetonträgern kleinere Durchbiegungen. Jedoch stellten die Mehrzahl der Forscher fest, dass sich die Durchbiegung von Spannbetonträgern infolge von Öffnungen teilweise stark vergrößert. Das einzige Konzept zur Bestimmung der Durchbiegung liegt von Barney [BHC77] vor. Zur Durchbiegung des gesamten Trägers infolge äußerer Lasten und Vorspannung wird die Durchbiegung der Öffnungsurte infolge der Querkräfte addiert. In den Öffnungsecken wird für die Gurte eine idealisierte Einspannung angenommen. Das Momentengelenk befindet sich vereinfachend in der Mitte der Gurte.

2.5 Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen

2.5.1 Versuche an Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen

In den Jahren 1967 und 1974 untersuchten erstmalig Ragan und Warwaruk [RAWA67; WAR74] das Verhalten von vorgespannten Plattenbalkenquerschnitten mit Öffnungen

anhand von Versuchen. Hierbei stellten sie fest, dass Öffnungen das Trag- und Verformungsverhalten von Spannbetonträgern nicht wesentlich beeinflussen.

Barney et al. [BHC77] führten eine Versuchsserie an 18 Trägern mit bis zu vier rechteckigen Öffnungen durch, um das Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Plattenbalken-Querschnitten zu untersuchen. Bei den Versuchen entstand ein Schlupf der Spannglieder, so dass die Träger frühzeitig versagten. Daher dürfen sich in deren Bemessungskonzept keine Öffnungen im Eintragungsbereich der Vorspannung befinden. Um die gleiche Tragfähigkeit wie bei ungeschwächten Spannbetonträgern zu erlangen, müssen zusätzlich Bügel neben den Öffnungen angeordnet werden.

Salam und Harrop [SAHA79] stellten 1979 bei ihrer Versuchsserie fest, dass wie bei Stahlbetonträgern mit Öffnungen die Biegebruchspannung nur dann reduziert wird, wenn die Druckzone durch eine Öffnung eingeschnürt ist. Die Spannungsverteilung um die Öffnungsgruppen ändert sich nicht wesentlich im Vergleich zu Trägern mit nur einer Öffnung. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse empfehlen Salam und Harrop, vertikale Bügel seitlich der Öffnungen und in stark querkraftbeanspruchten Bereichen zusätzlich eine Verbügelung der Ober- und Untergurte anzuordnen. Diese Bewehrungsführung verhindert das horizontale Aufspalten des Trägers durch die Vorspannung bzw. durch äußere Lasten.

2.5.2 Bemessungskonzepte für Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen

Die unterschiedlichen Bemessungskonzepte für Spannbetonträger mit einer Einzelöffnung werden von diversen Forschern [BHC77; SAHA79, MATA99] auf Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen übertragen, jedoch ohne die Gültigkeit des Bemessungsmodells zu überprüfen.

2.5.3 Ermittlung der Durchbiegung von Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen

Mansur et al. [MATA99] haben den Vorschlag von Barney [BHC77] zur Ermittlung der Durchbiegung von Spannbetonträgern mit einer Öffnung auf Spannbetonträger mit mehreren Öffnungen übertragen, indem sie die Verformungen der Öffnungsgurte mit der Anzahl der vorhandenen Öffnungen multiplizieren. Hierbei wurden jedoch nur

rechteckige Öffnungsformen betrachtet. Eine Bestätigung dieses Konzeptes durch Versuchsergebnisse liegt nicht vor.

2.6 Bewertung der durchgeführten Versuche und Bemessungskonzepte

Die Mehrzahl der bisher vorliegenden Bemessungskonzepte beschränkt sich auf die Bemessung von Stahlbetonträgern mit einer Einzelöffnung. Daher ist die Übertragbarkeit der Konzepte auf Träger mit Öffnungsgruppen und vorgespannte Träger zu überprüfen.

Für Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen führte vor allem Wagner eine große Versuchsserie durch. In seiner Versuchsdokumentation fehlen jedoch Angaben zur Durchbiegung der Versuchsträger. Der geringe Umfang der Versuchsserien anderer Forscher erlaubt keine abgesicherte Beurteilung des Durchbiegungsverhaltens von Stahlbetonträgern in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl. Weiterhin sind die unterschiedlichen Angaben zur Ausbildung der Stege zwischen zwei Öffnungen zu untersuchen und mit systematischen FE-Analysen sowie Versuchen abzusichern. Ein umfassendes und abgesichertes Bemessungskonzept für die Stege zwischen zwei Öffnungen liegt bisher nicht vor.

Auch für Spannbetonträger mit einer Einzelöffnung und mit Öffnungsgruppen existiert kein einheitliches und abgesichertes Bemessungskonzept. Es gibt unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Querkraftverteilung auf die Gurte. Auch muss die genaue Lage des Momenten-Nullpunktes in den Gurten bestimmt werden, da hierzu bisher keine Vorschläge vorliegen. Das Verfahren von Barney zur Ermittlung der Durchbiegung muss anhand von Versuchsergebnissen überprüft und gegebenenfalls modifiziert werden.

Die Ergebnisse aus den bereits durchgeführten Versuchen und die Erkenntnisse aus den Bemessungskonzepten fließen in die Entwicklung des neuen Bemessungskonzeptes mit ein (siehe Kapitel 5).

Kapitel 3

Experimentelle Untersuchung an Stahlbetonträgern mit großen Einzelöffnungen

3.1 Vorbemerkungen

Das Ziel der Versuchsserie war die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbetonträgern mit auflagnahen Öffnungen [NESC02; SEN02; NSD01]. Bei auflagnahen Öffnungen herrscht im Bereich der Öffnung ein kleines M/V -Verhältnis vor. Aufgrund der Ausbildung von D-Bereichen neben dem Auflager werden die Schnittgrößen beeinflusst (siehe Kapitel 2.2.2.3). Daher war in der Vergangenheit eine unbeeinflusste Untersuchung von auflagnahen Öffnungen mit großer Querkraftbeanspruchung nicht möglich. Aus diesem Grund wird ein Versuchsaufbau in Anlehnung an Reit [REI94] weiterentwickelt. Dieser innovative Versuchsaufbau ermöglicht die getrennte Steuerung der einwirkenden Querkraft und des einwirkenden Biegemoments. Somit kann erstmalig das Trag- und Verformungsverhalten von Trägern mit auflagnahen Öffnungen versuchstechnisch erfasst werden.

3.2 Versuchsaufbau

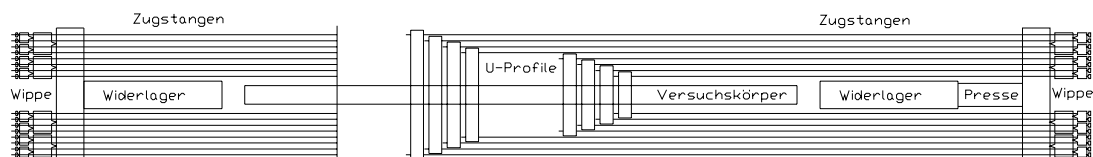
Der Vorteil des Versuchsaufbaus liegt in der unabhängigen Erzeugung von Moment und Querkraft (siehe Abbildung 3.1). Das statische System besteht aus einem Einfeldträger

mit zwei symmetrischen Kragarmen. Die Öffnung befindet sich in der Mitte des Trägers (siehe Abbildung 3.2).



Abbildung 3.1: Versuchsstand

Draufsicht



Ansicht

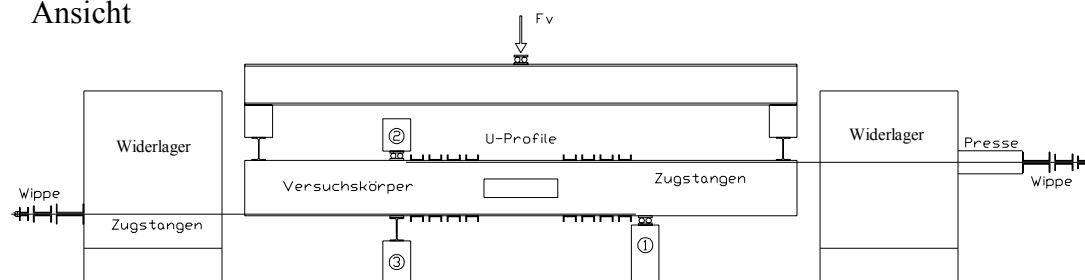


Abbildung 3.2: Draufsicht und Ansicht des Versuchsaufbaus

Zur Erzeugung des einwirkenden globalen Biegemoments werden zwei Einzellasten an den jeweiligen Kragarmenden aufgebracht. Über eine Traverse werden beide

Einzellasten mit einer Hydraulikpumpe gesteuert. Hierdurch wird zwischen den beiden Auflagern ein konstantes Biegemoment erzeugt (siehe Abbildung 3.3).

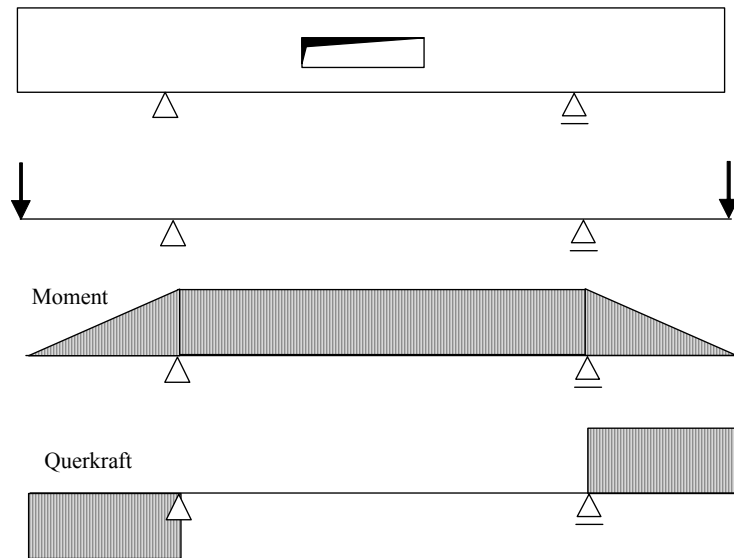


Abbildung 3.3: Statisches System mit Belastung zur Erzeugung eines konstanten Moments in Öffnungsmitte

Weiterhin wird ein Gleichstreckenmoment aufgebracht, um eine konstante Querkraft zwischen den Auflagern zu erzeugen (siehe Abbildung 3.4).

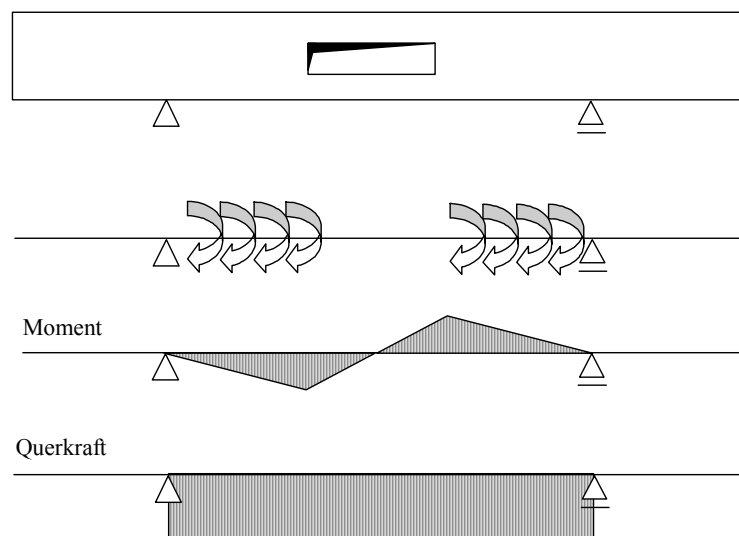


Abbildung 3.4: Statisches System mit Belastung zur Erzeugung einer konstanten Querkraft in Öffnungsmitte

Das Gleichstreckenmoment wird an acht Lasteinleitungspunkten als Kräftepaare über Stahlprofile in den Beton eingeleitet. Die Lasteinleitungspunkte sind in den Bereichen zwischen den Öffnungsanschnitten und den Auflagern angeordnet.

In der horizontalen Ebene werden an beiden Versuchsträgerenden Wippenkonstruktionen angeordnet (siehe Abbildung 3.5). Diese Wippenkonstruktionen dienen zur gleichmäßigen Einleitung der horizontalen Kräfte in die einzelnen Zugstangen. In vier Ebenen wird jeweils eine Kraft durch die Wippenkonstruktion in zwei gleich große Kräfte aufgeteilt, so dass schließlich 16 gleich große Kräfte in den Zugstangen erzeugt werden (siehe Abbildung 3.6). Wird die Last ungleichmäßig in die Stangen eingeleitet, verdreht sich die Wippenkonstruktion zum Ausgleich, um eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte in die Zugstangen zu gewährleisten. Die äußerst sensibel reagierenden Wippenkonstruktionen werden während der gesamten Lastgeschichte kontrolliert.



Abbildung 3.5: Wippenkonstruktion

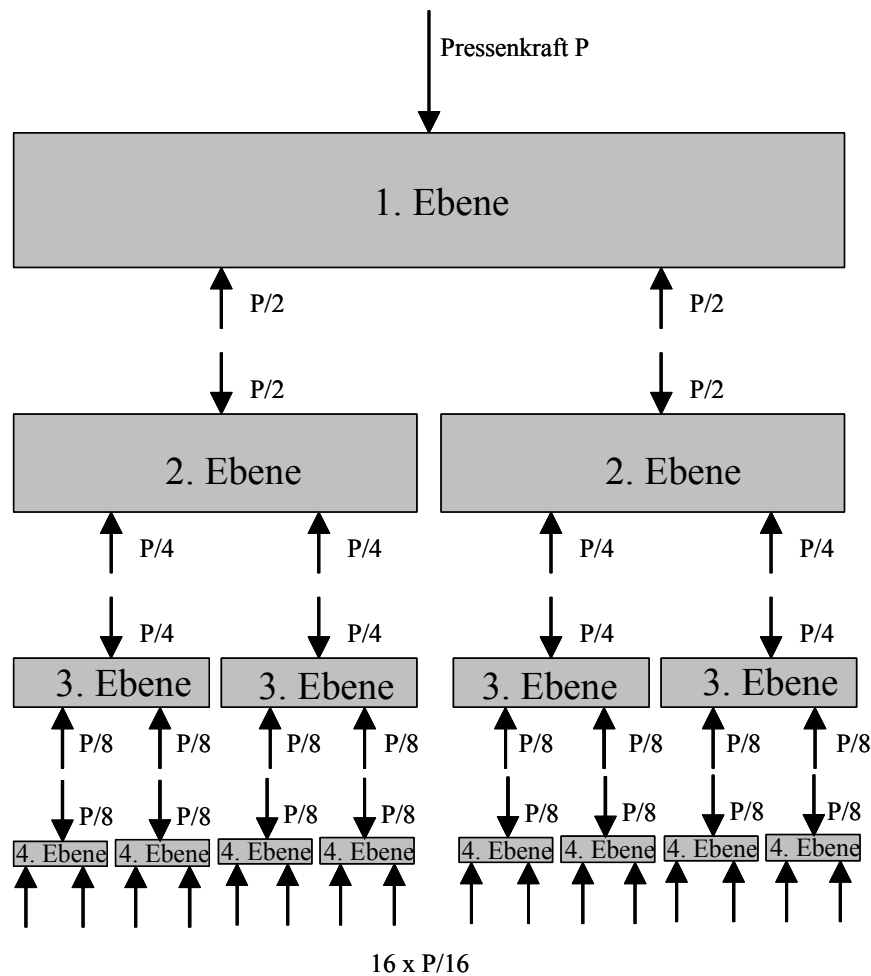


Abbildung 3.6: Statisches System und Belastung auf die Wippenkonstruktion

An den Zugstangen sind zur Kontrolle der Kräfte Dehnungsmessstreifen befestigt. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Kräfte zu jedem Zeitpunkt der Lastgeschichte in sämtlichen Zugstangen gleich groß sind. Somit kann die einwandfreie Wirkungsweise der Wippenkonstruktionen bestätigt werden.

Jeweils zwei Zugstangen sind an einem Stahlprofil befestigt. Zunächst wird zur Einleitung des Gleichstreckenmoments in den Beton die Befestigung von Stahlprofilen auf den Betonträger mittels einer querkraftübertragenden Klebeverbindung vorgesehen. In Vorversuchen sind jedoch Schwierigkeiten auf, da vor dem eigentlichen Versagen des Trägers die Stahlprofile samt Betondeckung abgerissen sind. Daher werden für die durchgeführten Großversuche Kopfbolzendübel mit einem Schraubengewinde angeordnet. Diese werden mit der notwendigen Verankerungslänge in den Träger einbetoniert, um ein vorzeitiges Abreißen vor dem eigentlichen Trägerversagen zu

verhindern. Anschließend werden U-Profile aus Stahl zur Lasteinleitung auf dem erhärteten Betonträger montiert (siehe Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8).



Abbildung 3.7: Konstruktion zur Einleitung des Gleichstreckenmoments

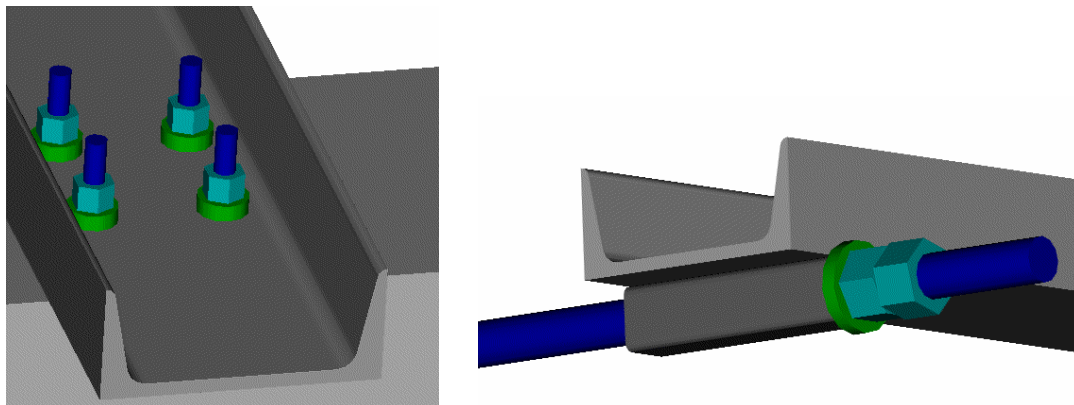


Abbildung 3.8: Detailzeichnungen
Links: Lasteinleitung Versuchsträger – U-Profil
Rechts: Lasteinleitung Zugstange – U-Profil

3.3 Versuchsprogramm

Die Versuchsserie wird so konzipiert, dass sämtliche Einflussparameter untersucht werden konnten. Eine umfassende Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens ist somit gewährleistet. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Insgesamt werden somit sechs Versuchskörper getestet. Die Bezeichnungen der Bewehrungen können Abbildung 3.9 entnommen werden.

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm (Variierte Parameter sind grau hinterlegt.)

| Nr. | M/V [m] | l_0 [cm] | A_{s1} [cm ²] | $A_{s2} - A_{s4}$ [cm ²] | α_t [-] | A_{sH1} [cm ²] | A_{sH2} [cm ²] | $a_{s,Massiv}$ [cm ² /m] | $a_{s,Gurt}$ [cm ² /m] |
|-----|------------|---------------|--------------------------------|---|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|
| E8 | 0,5 | 80 | 9,82 | 2,26 | 0,27 | 4,52 | 3,14 | 5,02 | 11,3 |
| E9 | 1,0 | 80 | 9,82 | 2,26 | 0,27 | 6,79 | 4,52 | 5,02 | 11,3 |
| E13 | 1,5 | 80 | 9,82 | 2,26 | 0,27 | 4,52 | 4,52 | 5,02 | 11,3 |
| E19 | 0,0 | 80 | 9,82 | 2,26 | 0,27 | 6,79 | 4,52 | 5,02 | 11,3 |
| E27 | 0,5 | 110 | 9,82 | 2,26 | 0,27 | 3,14 | 3,14 | 5,02 | 11,3 |
| E45 | 0,5 | 80 | 4,02 | 4,02 | 0,5 | 4,52 | 4,52 | 5,02 | 11,3 |

mit

M/V Verhältnis zwischen Moment und Querkraft

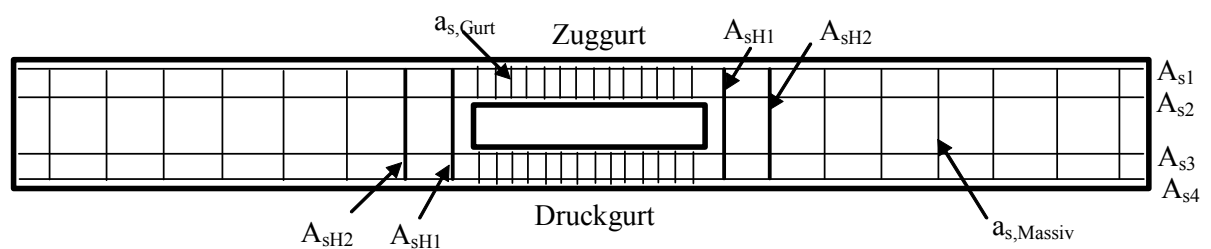
 l_0 Öffnungslänge A_{s1} Querschnittsfläche der Längsbewehrung im Zuggurt (oben) $A_{s2} - A_{s4}$ Querschnittsflächen der Längsbewehrung im Zuggurt (unten) und im Druckgurt (oben und unten) α_t Verhältnis zwischen der Längsbewehrung im Druckgurt und der gesamten Längsbewehrung A_{sH1} Vertikal angeordnete Aufhängebewehrung seitlich der Öffnung A_{sH2} Zweite vertikal angeordnete Aufhängebewehrung seitlich der Öffnung $a_{s,Massiv}$ Bügelbewehrung in den Bereichen neben der Öffnung $a_{s,Gurt}$ Bügelbewehrung in den Öffnungsgurten

Abbildung 3.9: Bezeichnung der Bewehrung bei negativem Moment

Um die Beanspruchung der Bereiche in den Öffnungsecken zu bewerten, wird das Verhältnis der maximal aufnehmbaren Kraft in der Aufhängebewehrung zur

einwirkenden Querkraft bestimmt. Der Schubkonzentrationsfaktor S berechnet sich nach Mansur [MATA99] zu:

$$S = \frac{f_y \cdot A_{SH}}{V_{tot}} \quad (3.1)$$

In der Literatur werden unterschiedliche Angaben zu der Größe des erforderlichen Schubspannungskonzentrationsfaktors gemacht.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der empfohlenen Schubkonzentrationsfaktoren aus der Literatur

| Literatur | Quelle | Schubkonzentrationsfaktor |
|------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Loretsen | [LOR62] | 1,0 |
| Prentzas | [PRE68] | 2,0 |
| Mansur und Tan | [MATA99] | 2,0 |
| Ehmann Wommelsdorff | [EHM02] [WOM03] | 1,6 für A_{SH1} ; 1,3 für A_{SH2} |
| Leonhardt | [LEO77a] | 0,8 |

Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Versagenslasten der Versuchsserie ergeben sich folgende Schubkonzentrationsfaktoren (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Schubkonzentrationsfaktoren der Versuchsserie

| Träger | Schubkonzentrationsfaktor |
|--------|---------------------------|
| E8 | 1,8 |
| E9 | 2,8 |
| E13 | 1,8 |
| E19 | 2,9 |
| E27 | 2,1 |
| E45 | 1,8 |

3.4 Bestimmung der spezifischen Betoneigenschaften

Für die Herstellung der Stahlbetonträger wird ein praxisüblicher Beton verwendet. Zur Bestimmung der spezifischen Betoneigenschaften werden zusätzlich Probekörper hergestellt (vgl. Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Probekörper zur Bestimmung der spezifischen Betoneigenschaften

| Betoneigenschaft | Probekörper - Geometrie | Abmessungen |
|--------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Druckfestigkeit | Würfel | 150 mm Kantenlänge |
| Biegezugfestigkeit | Prismen | 700 x 150 x 150 mm ³ |
| E-Modul | Zylinder | h = 300 mm, Ø = 150 mm |

Die Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper erfolgt nach DIN 1048. In Tabelle 3.5 sind die aus jeweils drei Prüfkörpern gemittelten Eigenschaften an dem jeweiligen Versuchstag aufgeführt.

Nach DIN 1045-2 gilt für die Druckfestigkeit, die an Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge und unter den Lagerungsbedingungen nach DIN 1048 gemessen wurde, folgende Umrechnung:

$$f_{c,cube} = 0,92 \cdot f_{c,dry} \quad (3.2)$$

Tabelle 3.5: Betoneigenschaften der Versuchskörper

| Versuchs- bezeichnung | Druckfestigkeit $f_{c,dry}$ [N/mm ²] | Druckfestigkeit $f_{c,cube}$ [N/mm ²] | Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ [N/mm ²] | E-Modul E_c [N/mm ²] |
|--------------------------|---|--|--|---------------------------------------|
| E8 | 43,04 | 39,60 | 2,78 | 26600 |
| E9 | 42,37 | 38,98 | 3,37 | 30100 |
| E13 | 42,70 | 39,28 | 3,34 | 30200 |
| E19 | 43,33 | 39,86 | 3,67 | 31000 |
| E27 | 40,67 | 37,42 | 4,10 | 29000 |
| E45 | 40,30 | 37,08 | 3,88 | 30000 |

3.5 Messtechnik

3.5.1 Übersicht

Für jeden Versuchskörper werden 64 Messpunkte (Kraftmessdosen, DMS, DMS-Rosetten, Wegaufnehmer sowie Potentiometeraufnehmer) eingerichtet. Zusätzlich werden photogrammetrische Messungen vorgenommen. Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die verwendete Messtechnik.

Tabelle 3.6: Überblick über die verwendete Messtechnik

| Zu messende Größe | Messtechnik |
|--|--|
| Dehnungen und Spannungen in der Längsbewehrung | - Dehnungsmessstreifen - Wegaufnehmer auf der Längsbewehrung |
| Dehnungen und Spannungen in der Bügelbewehrung | - Dehnungsmessstreifen - Wegaufnehmer auf der Bügelbewehrung |
| Gurtverformung | - Potentiometer (Vertikalverformung) - Photogrammetrie (Gesamtverformung) |
| Querkraftverteilung auf die Gurte | - Dehnungsmessstreifen auf den Bügeln - DMS-Rosetten auf dem Beton |
| Dehnungen des Betons | - Wegaufnehmer auf dem Beton - Photogrammetrie |
| Lasteinleitung und Auflagerkräfte | - Kraftmessdosen |

Zur Dehnungsmessung in der Längs- und Bügelbewehrung werden zum einen Dehnungsmessstreifen und zum anderen Wegaufnehmer eingesetzt, so dass die Ergebnisse der beiden Messmethoden miteinander verglichen werden können. Der Nachteil der Dehnungsmessstreifen besteht in fehlerhaften Messdaten, sobald sich Risse im Beton im Bereich der Dehnungsmessstreifen bilden. Zudem können Beschädigungen der Dehnungsmessstreifen beim Betoniervorgang entstehen. Daher werden zur Messung der Stahldehnung mittels eines Wegaufnehmers zwei Muffen in einem konstanten Abstand der Länge l auf die Bewehrung geschweißt. Diese Muffen werden mit Silikon bzw. Fett ausgespritzt und mit einer Styroporkappe versehen. Nach dem Betonieren werden Styropor und Silikon entfernt. Durch die Styroporkappen entstehen kleine Aussparungen um die Muffen herum, so dass sich die Muffen mit der Bewehrung ungehindert verschieben können. Zwischen den beiden Muffen wird mittels

Gewindestangen ein Wegaufnehmer befestigt. Die Dehnungen der Bewehrung können somit über die Länge l gemessen und die mittleren Dehnungen bestimmt werden. Unabhängig von der Rissbildung im Beton können mit dieser Methode Messdaten präzise erfasst werden.

Mittels beider Methoden sind die entstandenen Fließgelenke in der Längsbewehrung nachgewiesen worden. Da jedoch der exakte Ort eines Fließgelenkes vorher nicht bestimmt werden kann, ist es aufgrund der größeren Messlänge wahrscheinlicher, dass der Wegaufnehmer im Vergleich zum Dehnungsmessstreifen das Fließgelenk erfassen kann.

In Abbildung 3.10 ist ein Überblick über die Anordnung der Potentiometer- und der Wegaufnehmer auf dem Versuchsträger gegeben. Die Positionen der Wegaufnehmer auf der Bewehrung sind in Abbildung 3.11 dargestellt, während Abbildung 3.12 die Anordnung sämtlicher Dehnungsmessstreifen auf der Bewehrung und der DMS-Rosetten auf dem Beton zeigt.

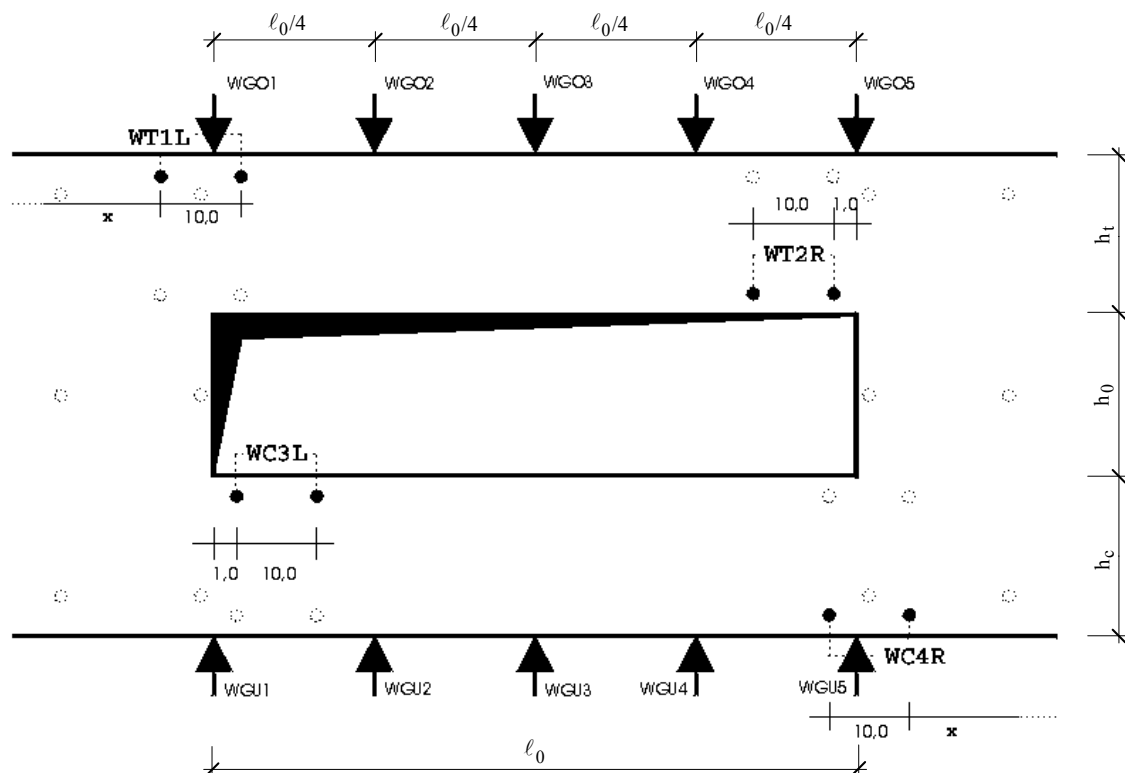


Abbildung 3.10: Positionen und Bezeichnungen der Potentiometer- und der Wegaufnehmer auf den Versuchsträgern

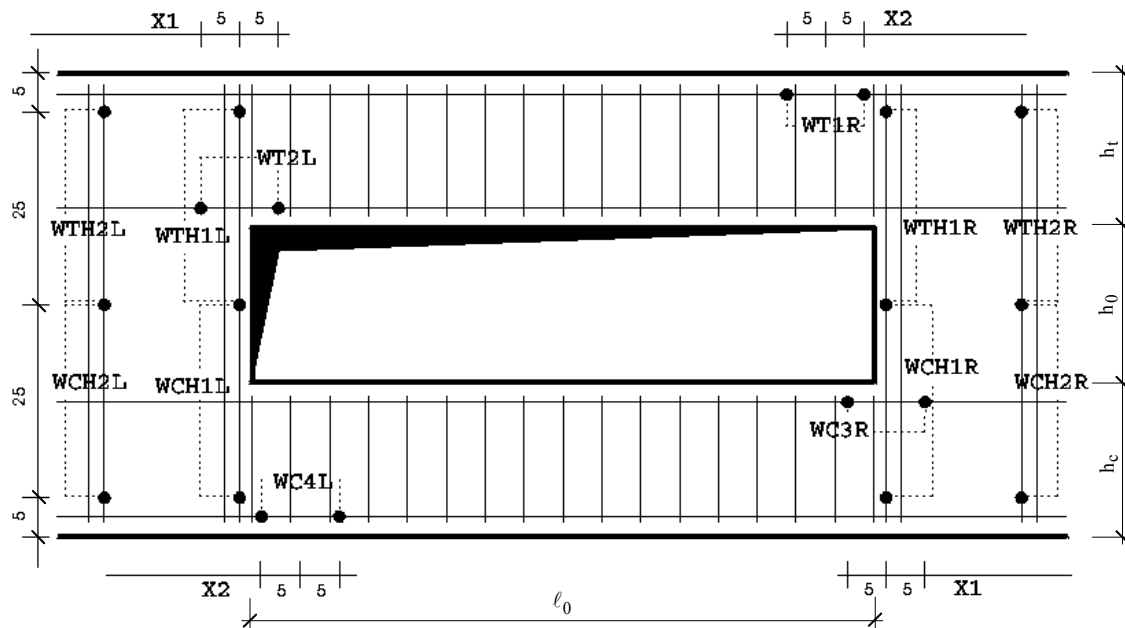


Abbildung 3.11: Positionen und Bezeichnungen der Wegaufnehmer auf den Bewehrungsstäben

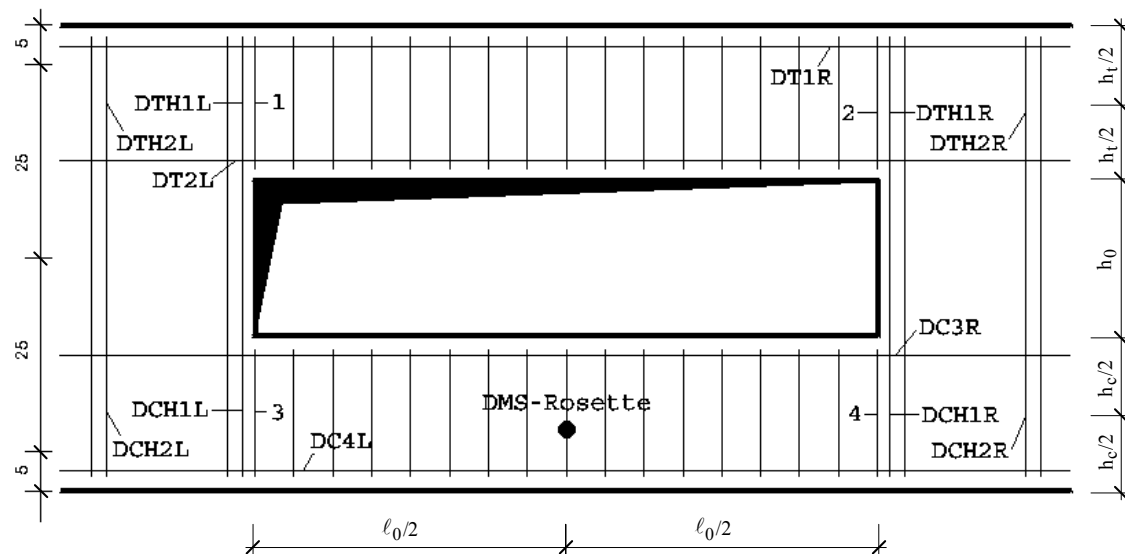


Abbildung 3.12: Positionen und Bezeichnungen der Dehnungsmessstreifen und der DMS-Rosette

3.5.2 Photogrammetrische Messungen

Durch photogrammetrische Messungen können Verformungen flächendeckend aufgenommen werden. Zudem kann eine Messgenauigkeit von 0,01 - 0,02 mm erreicht werden [BGS00]. Diese Methode hat den weiteren Vorteil, dass beim Versagen des Trägers keine Messtechnik beschädigt werden kann. Hegger et al. [HEGÖ02; GÖR04] bewiesen bei der Erfassung von Schubrisen im Beton, dass mit photogrammetrischen Messungen sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

Um die Beanspruchung und die Verformung der Gurte besser erforschen zu können, werden die Öffnungsbereiche von zwei Versuchsträgern mit Hilfe von photogrammetrischen Messungen untersucht [NESC03]. Hierbei werden Messmarken mit einem Durchmesser von 8 mm in einem Raster von 2 cm auf die Versuchsträger geklebt (siehe Abbildung 3.13). Zusätzlich werden drei Referenzstäbe mit Marken in einem vertikalen Abstand von 5 cm versehen, um die Messergebnisse im Anschluss zu kalibrieren. Diese werden vor dem Versuchsträger seitlich der Messfelder positioniert. Weiterhin wird die Raumtemperatur im Bereich der Versuchskörper bei jedem Lastschritt dokumentiert, um die Ausdehnung der Referenzstäbe infolge von Temperaturschwankungen bei der späteren Auswertung zu berücksichtigen. Die Abstände der Messmarken werden nach der Versuchsdurchführung auf der Interferometerbahn des Geodätischen Institutes der RWTH Aachen vermessen.

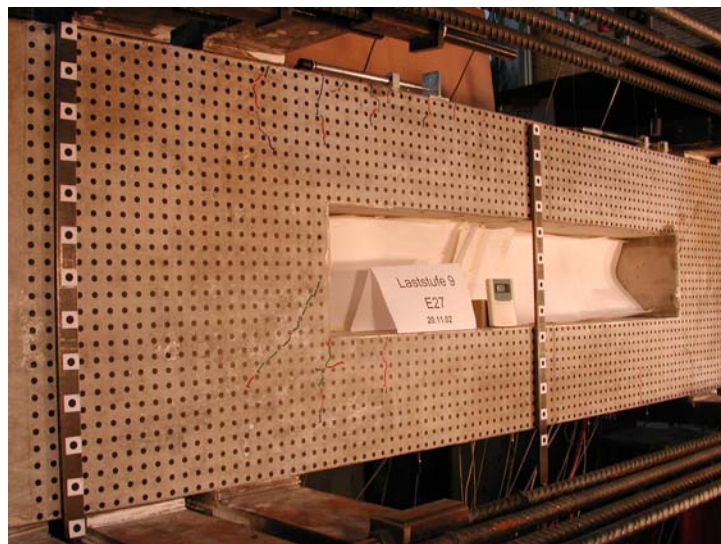


Abbildung 3.13: Messpunkte für die photogrammetrischen Messungen

Der untersuchte Messbereich wird aufgrund seiner Größe in zwei Hälften geteilt. Nach jeder Laststufe werden für jede Hälfte neun Fotos aus neun verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Hieraus können die Verformung des Gesamtträgers und der Gurte, die Rissbildung sowie die Dehnungsverteilung bei der jeweiligen Laststufe ermittelt werden. In Abbildung 3.14 ist das Rissbild des Versuchsträgers E27 dargestellt. Mit Hilfe des Programms PHIDIAS [BESC97] werden die photogrammetrischen Messwerte ausgewertet und über eine programmierte Schnittstelle in das FE-Programmsystem DIANA eingelesen. Die Ergebnisse der photogrammetrischen Messungen sind in Abbildung 3.15 dargestellt. Deutlich sind die Spannungsspitzen in den Öffnungsecken und somit die Bildung der beiden Fließgelenke in der Längsbewehrung erkennbar. Den photogrammetrischen Messungen wird das Rissbild aus der FE-Berechnung gegenübergestellt (Abbildung 3.16). Da bei den FE-Berechnungen die verschmierte Rissbildung gewählt wird, sind die Risse verteilt, während bei den photogrammetrischen Messungen diskrete Einzelrisse festgestellt werden können.

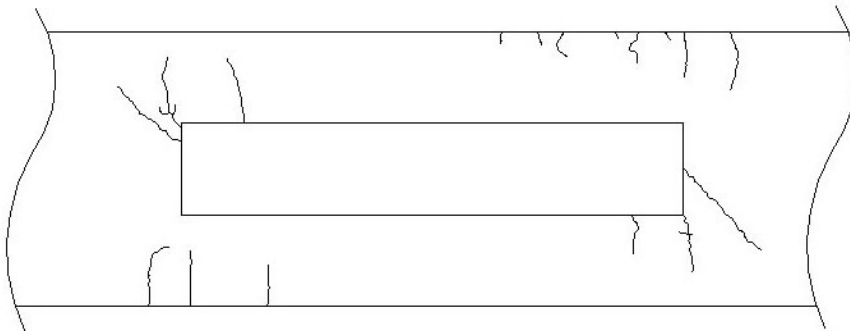


Abbildung 3.14: Rissbild des Trägers E 27 bei der Versuchsdurchführung



Abbildung 3.15: Auswertung der photogrammetrischen Messungen für beide Messbereiche

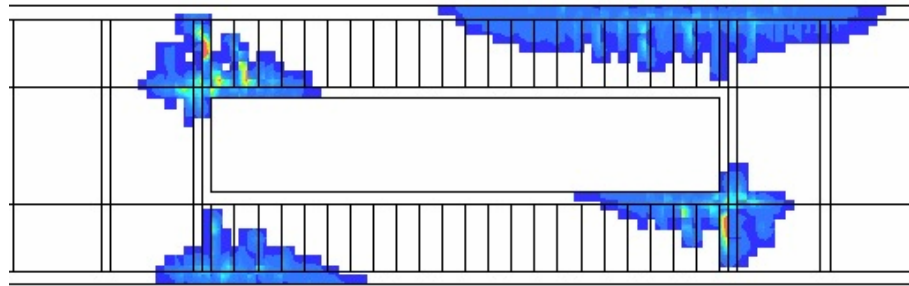


Abbildung 3.16: Rissbild aus FE-Berechnung

Die Verformungen der beiden Messbereiche werden aus den photogrammetrischen Daten errechnet (siehe Abbildung 3.17). Die Vierendeelträgerwirkung ist deutlich zu erkennen.

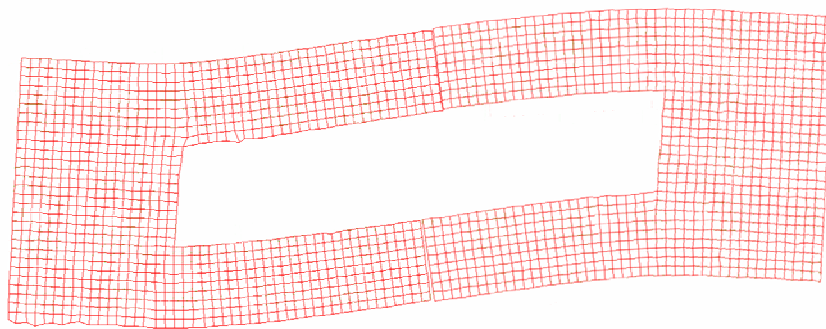


Abbildung 3.17: Verformungsfigur aus den photogrammetrischen Messungen der beiden Messbereiche

3.6 Auswertung der Versuchsergebnisse

3.6.1 Allgemeines

Das Trag- und Verformungsverhalten der Versuchsbalken wird nachfolgend analysiert. Insbesondere wird auf die Ermittlung der Querkraftverteilung und die Lage der Momentennullpunkte sowie die Entwicklung der Rissbildung eingegangen. Zur

Ausbildung einer kinematischen Kette im Öffnungsbereich sind vier Fließgelenke erforderlich. Jedoch bildet sich das vierte Fließgelenk teilweise erst zu einem sehr späten Zeitpunkt aus. In Anlehnung an Ehmann [EHM02] wird als Versagenslast das Entstehen des ersten Fließgelenkes festgelegt. Eine Fließgelenkbildung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist dadurch ausgeschlossen. Das Anwachsen der Durchbiegung infolge der Ausbildung von Fließgelenken wird verhindert.

3.6.2 Versagenslasten und Entstehung des ersten Fließgelenkes

In Tabelle 3.7 sind die Versagenslasten bei Entstehung des ersten Fließgelenkes und die Lage des ersten Fließgelenkes aus den Versuchsergebnissen aufgeführt. Die möglichen Stellen, an denen ein Fließgelenk entstehen kann, sind in Abbildung 3.18 angegeben. Vereinzelt treten Fließgelenke an mehreren Stellen zum gleichen Zeitpunkt auf, wie beispielsweise bei Träger E45. Die Versagenslasten der Träger sind mit Ausnahme von Träger E27 näherungsweise gleich hoch. D.h. der Einfluss der Öffnungslage auf die Versagenslast ist gering, während eine größere Öffnungslänge die Versagenslast maßgeblich reduziert. Die Versagenslast des Trägers mit einer Öffnungslänge von 110 cm beträgt lediglich ca. 60% der Versagenslast eines Trägers mit einer Öffnungslänge von 80 cm. Bei den Trägern mit $M/V \geq 0,5$ m entsteht das erste Fließgelenk an der Stelle T2, da zum einen die Zugkraft aus dem globalen Biegemoment von der Bewehrung im Zuggurt aufgenommen werden muss und zum anderen die zweite Bewehrungslage einen kleineren Querschnitt als die globale Längsbewehrung aufweist. An der Stelle T2 muss zusätzlich die aus dem Fachwerk resultierende Zugkraft hochgehängt werden. Bei dem Träger E19 ($M/V = 0$) entsteht das erste Fließgelenk an der Stelle C3. Aufgrund des fehlenden Biegemomentes werden die Gurte nur durch die Sekundärmomente belastet. An der Stelle C3 ist die Belastung im Verhältnis zur vorhandenen Längsbewehrung am größten.

Tabelle 3.7: Versagenslast und Lage des ersten Fließgelenkes

| Nr. | M/V [m] | l_0 [cm] | α_t [-] | Versuchsdaten | |
|-----|------------|---------------|-------------------|--|-------------------|
| | | | | Querkraft bei Auftreten des 1. FG [kN] | Lage des 1. FG |
| E8 | 0,5 | 80 | 0,27 | 109,0 | T2 |
| E9 | 1,0 | 80 | 0,27 | 105,0 | T2 |
| E13 | 1,5 | 80 | 0,27 | 110,0 | T2 |
| E19 | 0,0 | 80 | 0,27 | 103,0 | C3 |
| E27 | 0,5 | 110 | 0,27 | 64,0 | T2 |
| E45 | 0,5 | 80 | 0,50 | 111,0 | T1 und T2 |

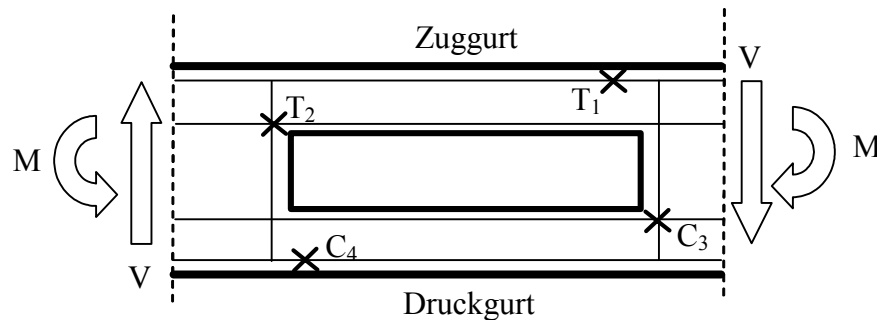


Abbildung 3.18: Bezeichnung der Fließgelenkorte

In Abbildung 3.19 ist die Kraft- Dehnungskurve für das Fließgelenk T2 des Trägers E19 dargestellt. Hierbei werden die Messergebnisse des Dehnungsmessstreifens und des Wegaufnehmers miteinander verglichen. Im Anfangs- und Endbereich stimmen die Kurven gut miteinander überein. Bei fortschreitender Rissbildung in den Öffnungsecken ergeben sich bei gleicher Last für die Messung mittels Wegaufnehmer größere Durchbiegungen. Dies ist mit dem größeren Messbereich zu erklären. In dem großen Messbereich bilden sich mehr Risse, d.h. die Dehnung der Längsbewehrung nimmt im Bereich der Risse stärker zu. Vor allem im Bereich der Öffnungsecken kommt es aufgrund von großen Spannungsspitzen zu einer verstärkten Rissbildung.

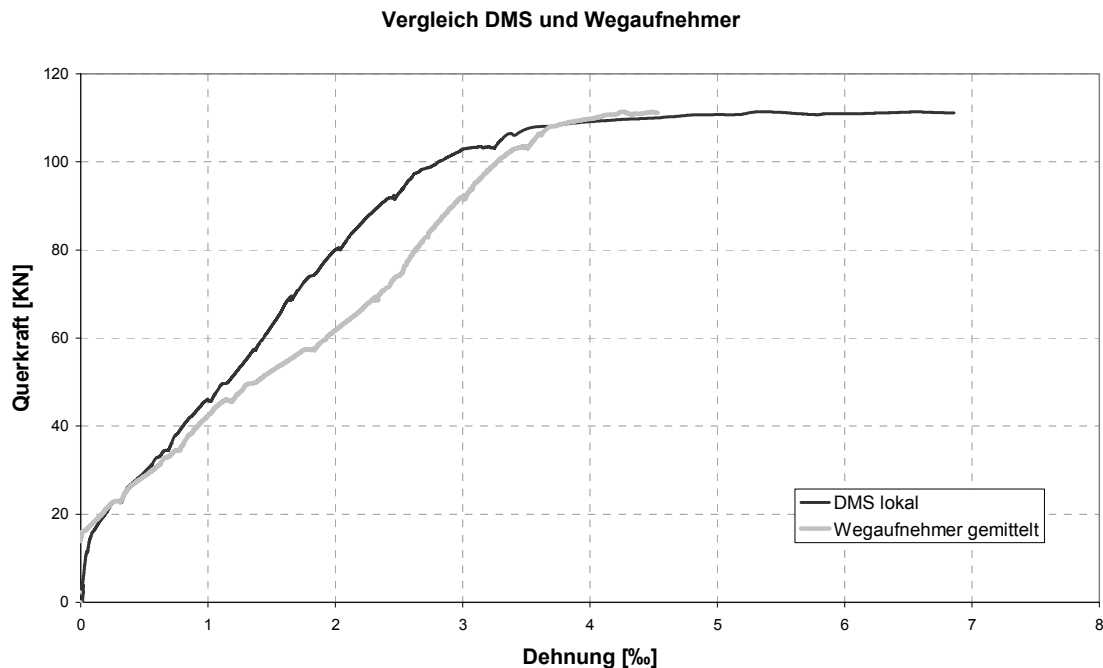


Abbildung 3.19: Dehnungen im Bereich T2 des Trägers E19

Nach Auswertung aller Messergebnisse ist festzustellen, dass sich infolge der unterschiedlichen Messbereiche Abweichungen ergeben. Zur wirklichkeitsgetreuen Erfassung der Rissbildung ist eine Kombination beider Messmethoden zu empfehlen.

3.6.3 Querkraftverteilung auf die Gurte

3.6.3.1 Vorgehensweise

Die Querkraftverteilung in den Gurten wird mit Hilfe der Dehnungsmessstreifen-Rosetten in Anlehnung an [TDF85] bestimmt. Die Rosettenmessungen werden nur am Druckgurt durchgeführt, da durch die Rissbildung im Zuggurt die Ergebnisse verfälscht werden. Aus den Messergebnissen der DMS-Rosetten ergeben sich die Schubverzerrungen γ [KEI95]. Aus den berechneten Schubverzerrungen werden die Schubspannungen ermittelt mit:

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (3.3)$$

Der Schubmodul G berechnet sich aus dem Elastizitätsmodul E :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu^2)} \quad (3.4)$$

Zur Ermittlung der Schubspannungen unter Berücksichtigung des Steifigkeitsabfalls infolge Rissbildung wird die tatsächlich vorhandene Steifigkeit der Gurte für jede Laststufe benötigt. Die Spannung in x-Richtung ergibt sich in Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls zu:

$$\sigma_x = E \cdot \frac{1}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \quad (3.5)$$

Aus der Spannung in x-Richtung wird die resultierende Kraft D im Druckgurt bestimmt:

$$D = \sigma_x \cdot A = E \cdot \frac{1}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \cdot A \quad (3.6)$$

Mit dem Produkt aus Druckkraft und Hebelarm der inneren Kräfte z wird das Moment M* auf Höhe der globalen Längsbewehrung berechnet.

$$M^* = D \cdot z = E \cdot \frac{1}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \cdot A \cdot z \quad (3.7)$$

Aus Gleichgewichtsgründen entspricht das Moment M* dem globalen Biegemoment:

$$M^* = M_{gl} \quad (3.8)$$

Unter Berücksichtigung des Flächenträgheitsmomentes im Zustand I wird die Gleichung nach der effektiven Steifigkeit EI_{eff} aufgelöst.

$$\Rightarrow EI_{eff} = \frac{M_{gl} \cdot I_1}{\frac{1}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \cdot A \cdot z} \quad (3.9)$$

In Abbildung 3.20 ist am Beispiel des Versuchsträgers E45 unter Berücksichtigung des M/V-Verhältnisses die berechnete effektive Steifigkeit in Abhängigkeit von der

Querkraft dargestellt. Die effektive Steifigkeit fällt von einem anfänglichen Wert von 4.500 kNm² auf 1.700 kNm² infolge des fortschreitenden Steifigkeitsverlustes ab.

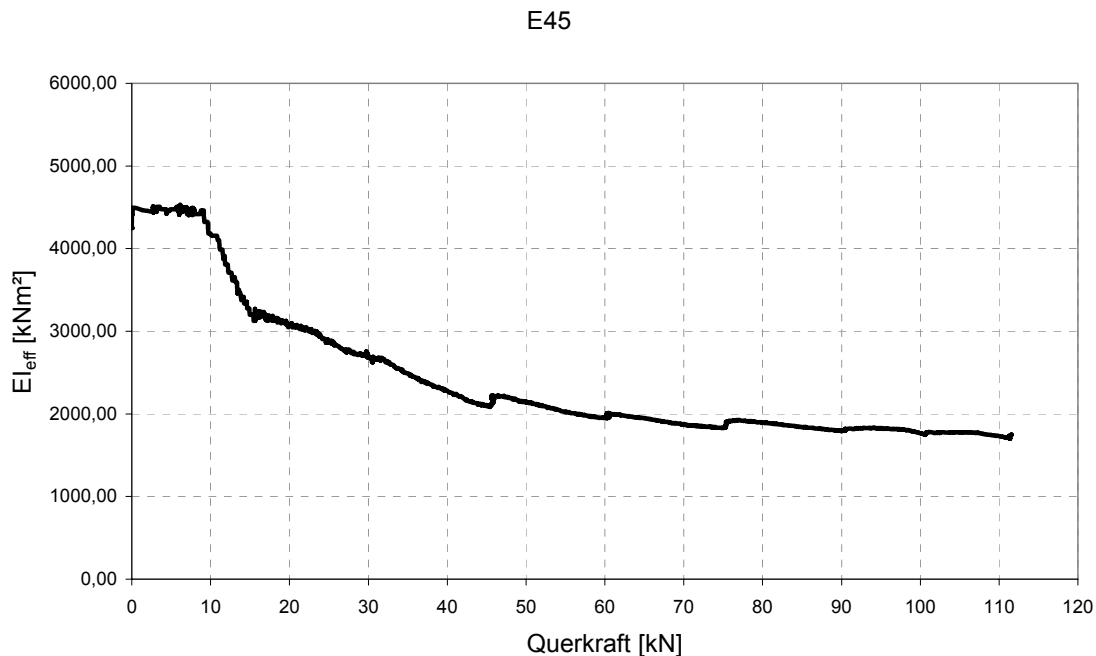


Abbildung 3.20: Verlauf der effektiven Steifigkeit EI_{eff} (Träger E45)

3.6.3.2 Ergebnisse

Die Querkraftverteilung ist in Abhängigkeit der Öffnungslage und der Öffnungslänge in Abbildung 3.21 bzw. in Abbildung 3.22 dargestellt. Wenn sich im Zuggurt Risse bilden, verliert der Zuggurt an Steifigkeit, so dass die Querkraft vermehrt über den Druckgurt abgetragen wird. Der Querkraftanteil im Druckgurt steigt an. Als nächstes bilden sich im Druckgurt Risse, so dass der Querkraftanteil wieder sinkt, bis sich schließlich das erste Fließgelenk bildet.

Der prinzipielle Verlauf der Querkraftanteile im Druckgurt ist für sämtliche Träger mit Ausnahme des Trägers E 19 gleich. E 19 weist das M/V-Verhältnis 0 auf, d.h. der Träger wird nur durch eine Querkraft beansprucht. Durch das fehlende globale Biegemoment ergeben sich somit zunächst auch keine Risse im Obergurt. Bei diesem Träger treten infolge der Sekundärmomente die ersten Risse im Untergurt auf, so dass der Querkraftanteil im Untergurt zunächst sinkt, bis sich Risse infolge der Sekundärmomente auch im Obergurt bilden.

Insgesamt ist zu festzustellen, dass bei ansteigendem M/V -Verhältnis auch der Querkraftanteil im Druckgurt größer wird. Dies resultiert aus den Steifigkeitsverlusten des Zuggurtes infolge der Rissbildung im Zuggurt. Bei einer größeren Biegemomentenbeanspruchung treten im Zuggurt verstärkt Risse auf.

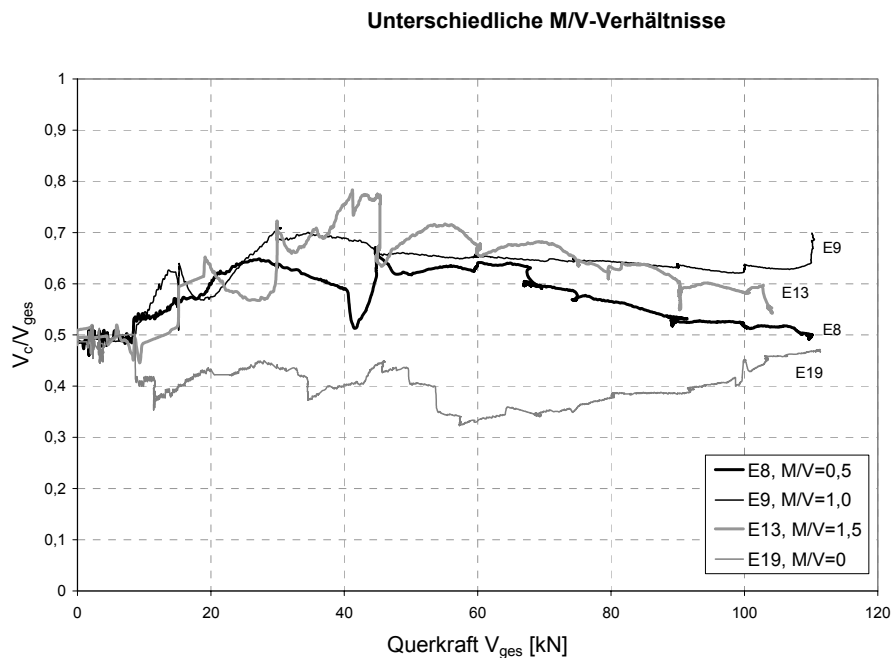


Abbildung 3.21: Querkraftverteilung für unterschiedliche M/V -Verhältnisse

Auch die Öffnungslänge beeinflusst die Querkraftverteilung. Bei einer größeren Öffnungslänge sind die Sekundärmomente aufgrund des längeren Hebelarms größer. D.h. auch im Druckgurt entstehen infolge der Sekundärmomente Risse, so dass bei Träger E27 der Querkraftanteil im Druckgurt geringer ist im Vergleich zu den Trägern mit kleinerer Öffnungslänge.

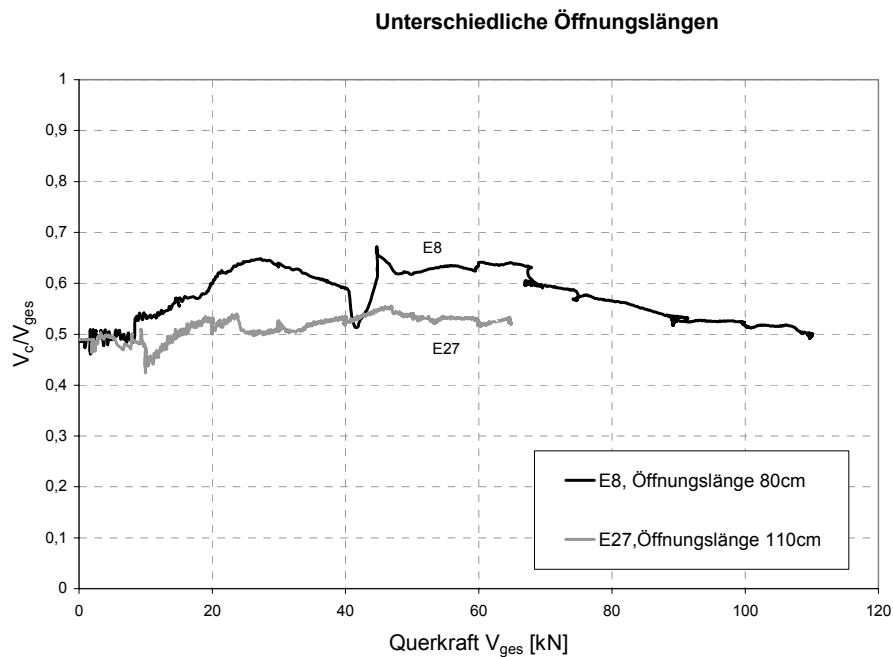


Abbildung 3.22: Querkraftverteilung für unterschiedliche Öffnungslängen

3.6.4 Lage der Momentennullpunkte in den Gurten

Die Verformungen der Ober- und Untergurte werden jeweils von fünf Potentiometeraufnehmern während der Versuchsdurchführung erfasst. Wie zu erwarten, verformen sich die Gurte wie bei einem Vierendeelträger (vgl. Abbildung 3.23 und Abbildung 3.24).

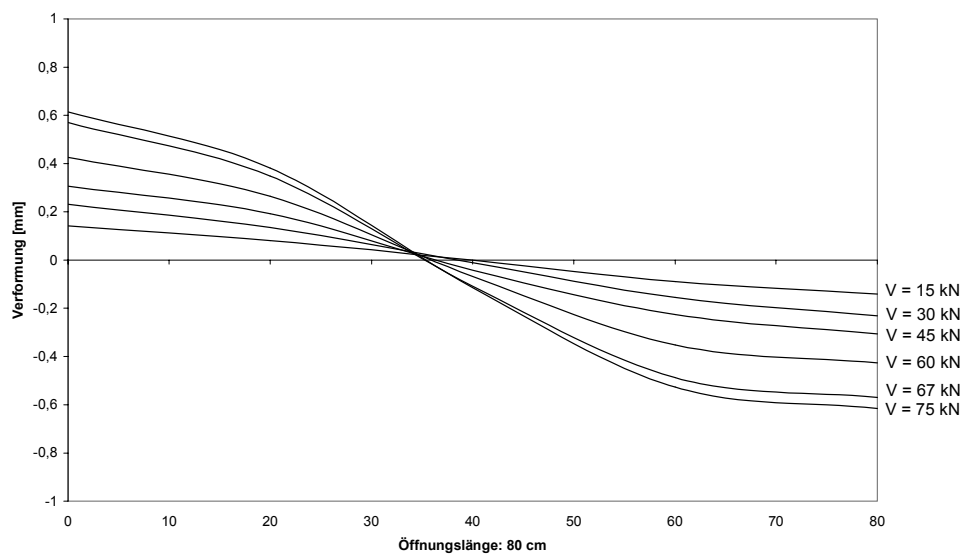


Abbildung 3.23: Verformung des Druckgurtes in Abhängigkeit der Laststufe (Träger E8)

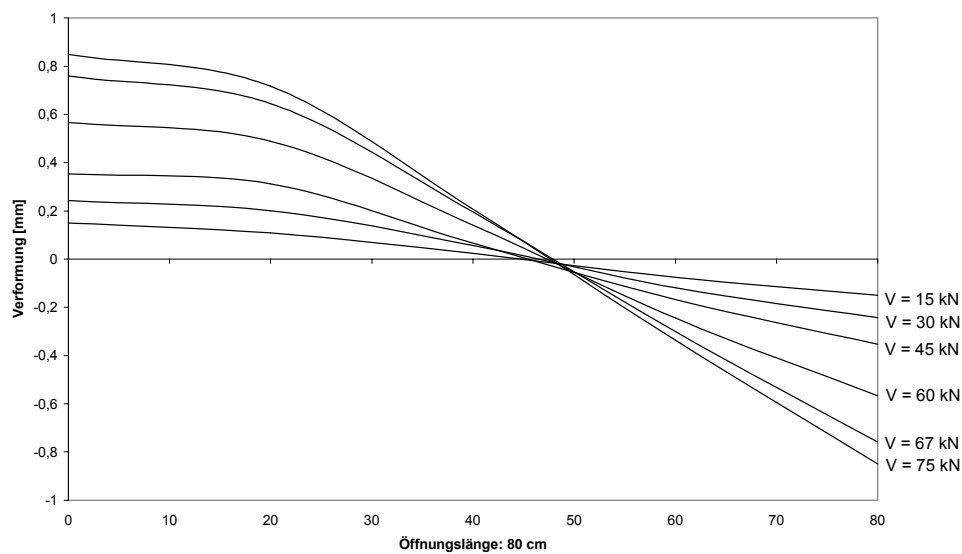


Abbildung 3.24: Verformung des Zuggurtes in Abhängigkeit der Laststufe (Träger E8)

Den Verformungskurven wird für jede Laststufe eine Polynomfunktion dritten Grades angenähert. Die Lage des Wendepunktes dieser Verformungskurven entspricht der Lage des Momentennulldurchgangs:

$$w'' = -\frac{M_y}{EI_y} = 0 \quad (3.10)$$

In Tabelle 3.8 ist die Lage des Momentennulldurchgangs aufgeführt. Für die Träger E9, E19 und E45 konnte aufgrund von fehlerhaften Messungen eines Potentiometeraufnehmers der Momentennulldurchgang des Druckgurtes nicht bestimmt werden. Das Vorzeichen der Lage des Momentennullpunktes im Zug- und Druckgurt ist in Abbildung 3.25 definiert.

Tabelle 3.8: Lage des Momentennulldurchgangs im Zug- und Druckgurt

| Nr. | M/V [m] | l_0 [cm] | α_t [-] | Exzentrizität [cm] | |
|-----|------------|---------------|-------------------|--------------------|-----------|
| | | | | Zuggurt | Druckgurt |
| E8 | 0,5 | 80 | 0,27 | -7,20 | 1,00 |
| E9 | 1,0 | 80 | 0,27 | -16,80 | - |
| E13 | 1,5 | 80 | 0,27 | -17,10 | -9,00 |
| E19 | 0,0 | 80 | 0,27 | -3,50 | - |
| E27 | 0,5 | 110 | 0,27 | -21,50 | 1,50 |
| E45 | 0,5 | 80 | 0,5 | -7,20 | - |

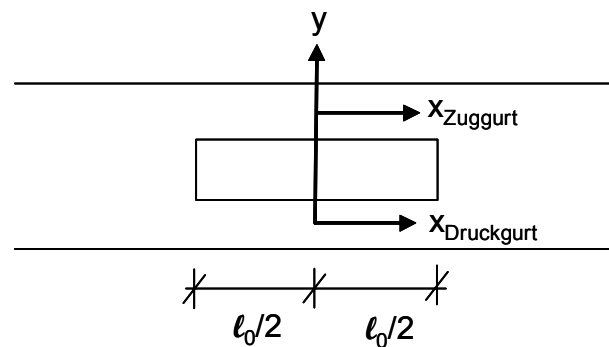


Abbildung 3.25: Vorzeichendefinition zur Ermittlung der Lage des Momentennulldurchgangs

Die Lage des Momentennulldurchgangs ist sowohl abhängig von der Öffnungslage als auch von der Öffnungslänge. Insgesamt ist die Exzentrizität der Lage des Momentennulldurchgangs im Zuggurt deutlich größer als im Druckgurt.

Kapitel 4

Grundlagen der numerischen Berechnungen

4.1 Allgemeines

Zur Verifikation der Versuchsergebnisse und zur Durchführung einer umfassenden Parameterstudie wurden Finite Elemente Berechnungen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens von Beton, Stahlbeton und Spannbeton durchgeführt.

Für die nichtlinearen FE-Berechnungen wurde das Finite Elemente Programm DIANA verwendet. In diesem Programm stehen neben einer umfassenden Elementbibliothek verschiedene Materialmodelle für den Zug- und Druckbereich zur Auswahl. Geometrische und physikalische Nichtlinearitäten sowie dynamische Belastungen können mit diesem Programm erfasst werden. Erfahrung im Umgang mit DIANA werden in [BORO91; FEBO93; MIE87; RNKB85] ausführlich dokumentiert.

4.2 Modellierung

Zur Modellierung der Träger werden isoparametrische Scheibenelemente mit acht Knoten gewählt. Somit ergeben sich 16 Translationsfreiheitsgrade pro Element (siehe Abbildung 4.1).

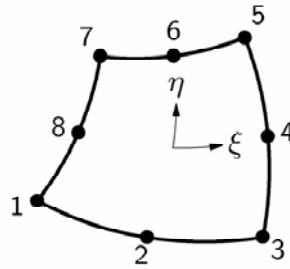


Abbildung 4.1: Gewähltes Element mit 16 Freiheitsgraden

Die Auswertung der Spannungen erfolgt in den Gauß-Integrationspunkten bei vollständiger Integration. Die Last wird schrittweise und kraftgesteuert aufgebracht. Im Bereich der Rissbildung und vor Erreichen der Versagenslast wurden die Lastschrittweiten zur Verbesserung der Konvergenz verkleinert. Zur Vermeidung von Spannungssingularitäten im Lasteinleitungs- und Auflagerbereich werden Stahlplatten mit einer im Vergleich zu den Betonelementen hohen Steifigkeit modelliert.

Als Iterationsverfahren wird das modifizierte Newton-Rahpson-Verfahren gewählt. Bei diesem Verfahren wird die tangentielle Steifigkeitsmatrix am Anfang eines neuen Berechnungsschrittes neu aufgestellt und dann innerhalb eines Lastinkrements konstant beibehalten. Zur Verbesserung der Konvergenz wird zusätzlich ein Suchalgorithmus (line search) gewählt [SCWR86].

Als Konvergenzkriterium wird das Energiekriterium gewählt. Hierbei werden durch ein Produkt aus Verschiebungs- und Kräftekriterium beide Größen berücksichtigt. Zunächst wird der Zuwachs an innerer Energie ermittelt, indem man die Arbeit der Ungleichgewichtskräfte entlang der Verschiebungszuwächse berechnet. Diese Arbeit wird mit dem Anfangszuwachs der inneren Energie innerhalb einer vorgegebenen Toleranz ε_E verglichen:

$$\frac{\Delta \underline{U}^{(i)T} \left(\underline{R}^{t+\Delta t} - \underline{F}^{(i-1)} \right)}{\Delta \underline{U}^{(1)T} \left(\underline{R}^{t+\Delta t} - \underline{F} \right)} \leq \varepsilon_E \quad (4.1)$$

4.3 Materialmodelle

4.3.1 Rechenkonzept

Zur wirklichkeitsnahen Modellierung von Beton- und Stahlbetonbauteilen stehen in DIANA zwei Konzepte zur Auswahl: Zum einen kann das Plasticity-Konzept für den Druckbereich und das Cracking-Konzept für den Zugbereich gewählt werden. Zum anderen bietet sich das Total-Strain-Konzept an, das sowohl Materialmodelle für den Druck- als auch für den Zugbereich beinhaltet. Das Total-Strain-Konzept basiert auf der ‚Modified Compression Field Theory‘ nach Vecchio und Collins [COMI91]. Beide Konzepte wurden mit Hilfe von umfangreichen Parameterstudien getestet. Hierbei wurde festgestellt, dass beide Konzepte sich gut zur Abbildung von Beton und Stahlbeton eignen. Mit dem Total-Strain-Konzept werden wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielt, so dass dieses Konzept für sämtliche Berechnungen gewählt wird.

Um die Tauglichkeit der verschiedenen Materialmodelle zu testen, wurden in DIANA einfache Prüfkörper modelliert und die Ergebnisse mit Versuchsergebnissen verglichen [NPS00]. Die Prüfkörper bestehen aus einem Druckwürfel unter ein- und mehrachsiger Belastung, einem unbewehrten und einem bewehrten Zugstab sowie einem unbewehrten Biegezugkörper. An diesen Kleinbauteilen wurden die in DIANA vorhandenen Materialmodelle überprüft und sämtliche Werkstoffkennwerte variiert.

4.3.2 Beton unter Druckbeanspruchung

Es wird zwischen einachsiger und mehrachsiger Druckbeanspruchung unterschieden. Bei einer einachsigen Druckbeanspruchung bis zu etwa 30% der Druckfestigkeit herrscht nahezu lineares Materialverhalten. Nach dem Erreichen von 40% der Druckfestigkeit beginnen die Mikrorisse zu wachsen. Dies führt zu einer Zerrüttung des inneren Betongefüges. Ab 90% der Druckfestigkeit nimmt die Krümmung der Arbeitslinie sehr stark zu. Die Druckfestigkeit ist erreicht, sobald in einem meist örtlich begrenzten Bereich Mikrorisse bis auf eine kritische Länge gewachsen sind. Bei verformungsgesteuerten Versuchen ist eine Abnahme der aufnehmbaren Kraft bei Verformungszunahme festzustellen. Dieses Verhalten wird auch als softening des Betons bezeichnet (siehe Abbildung 4.2).

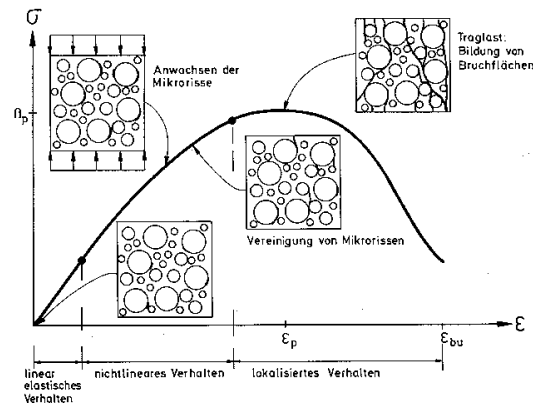


Abbildung 4.2: Druckspannungs- Dehnungsdiagramm eines einaxial gedrückten Würfels mit schematischer Darstellung der fortschreitenden Rissbildung nach [MEKO95]

Innerhalb des Total-Strain-Konzepts stehen verschiedene Modelle für den Druckbereich des Betons zur Verfügung (siehe Abbildung 4.3). Eigene Voruntersuchungen haben ergeben, dass das Modell nach Thorenfeldt das Materialverhalten im Druckbereich wirklichkeitsgetreu wiedergibt. Die Spannungs-Dehnungskurve nach Thorenfeldt [DIA03] wird beschrieben durch:

$$\sigma_c = -f_c \cdot \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}} \cdot \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}}\right)^{nk}} \quad (4.2)$$

Mit

f_c Höchstwert der Betondruckspannung

ϵ_c variable Betondehnung

ϵ_{cl} Betondehnung bei Erreichen der Höchstbetondruckspannung

n Beiwert $n = 0,80 + \frac{f_{c,cube}}{17}$

k Beiwert $k = \begin{cases} 1 & \text{für } 0 > \epsilon_c > \epsilon_{cl} \\ 0,67 + \frac{f_{c,cube}}{62} & \text{für } \epsilon_c \leq \epsilon_{cl} \end{cases}$

$f_{c,cube}$ Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen

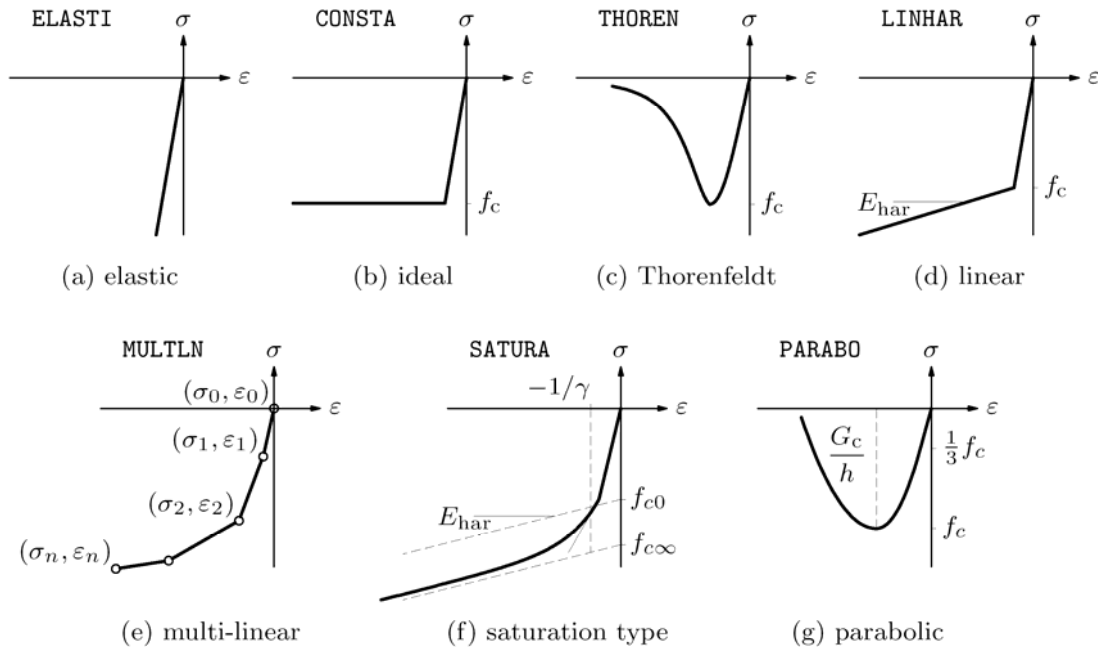


Abbildung 4.3: Materialmodelle in DIANA für den Druckbereich [DIA03]

Innerhalb des Total-Strain-Konzepts kann auch der Einfluss der Rissbildung senkrecht zur Beanspruchungsebene auf die Druckfestigkeit berücksichtigt werden. Infolge der Querkzugdehnung ε_1 reduziert sich die Druckfestigkeit um den Faktor β aus Gleichung 4.3 [DIA03]. Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Querkzugdehnung ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

$$\beta = \frac{f_{2,max}}{f'_c} = \frac{1}{0,8 + 170 \varepsilon_1} \quad (4.3)$$

Mit $f_{2,max}$ Druckfestigkeit unter Berücksichtigung der Querkzugdehnung
 f'_c Zylinderdruckfestigkeit

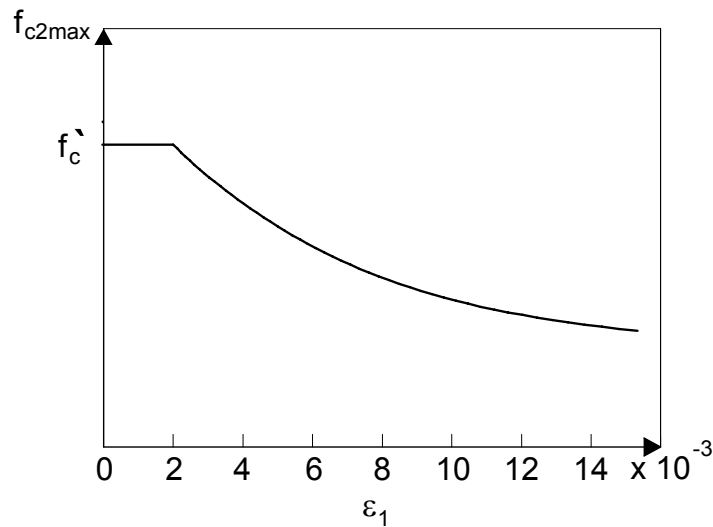


Abbildung 4.4: Verlauf der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Querkzugdehnung nach Vecchio und Collins [COMI91; VECO86]

Eine zweiachsiale Druckbeanspruchung bewirkt eine Festigkeitssteigerung, da die entstehenden Querkzugspannungen reduziert werden. Zur Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens von Beton unter zweiachsialer Druckbeanspruchung dienten als Grundlage die Versuche von Kupfer et al. [KUP73]. Mit eigenen FE-Berechnungen konnten die Versuchsergebnisse wirklichkeitsgetreu abgebildet werden (siehe Abbildung 4.5). Für den zweiachsialen Spannungszustand wurde das Modell nach Drucker-Prager eingesetzt.

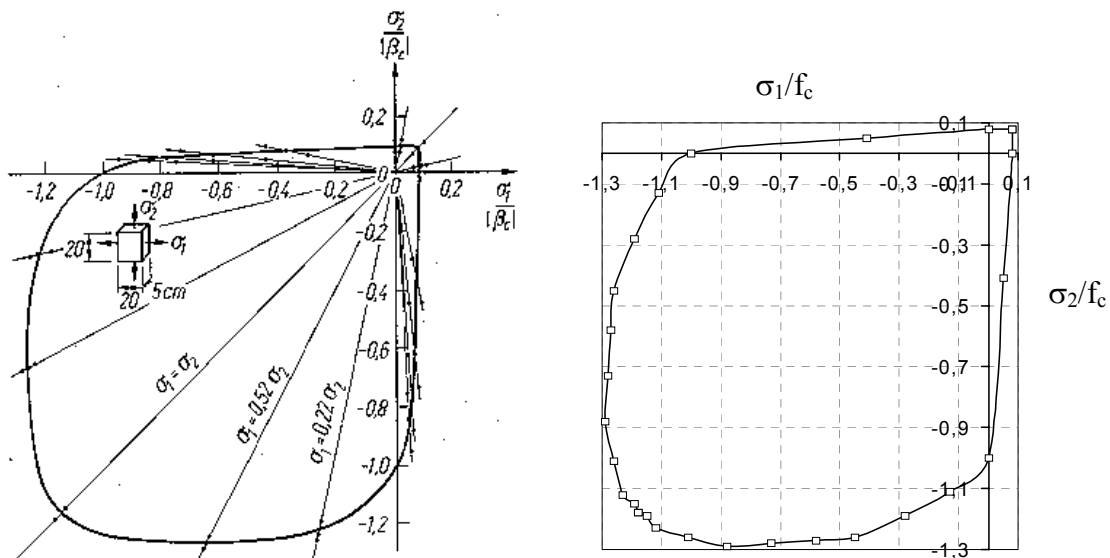


Abbildung 4.5: Zweiachsiale Druckfestigkeit nach Kupfer sowie Ergebnisse der FE-Berechnung

Auch die dreiachsiale Druckfestigkeit konnte mit dem FE-Programm DIANA wirklichkeitsgetreu abgebildet werden [NPS00]. Zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Trägern mit Öffnungen ist jedoch eine zweidimensionale Abbildung ausreichend, um das Trag- und Verformungsverhalten wirklichkeitsnah zu erfassen.

4.3.3 Beton unter Zugbeanspruchung

Die Zugfestigkeit von Beton beträgt in der Regel weniger als 10% der vorhandenen Druckfestigkeit und ist zudem starken Streuungen unterworfen. Bei einem zentrischen Zugversuch verhält sich der Beton bis zum Erreichen der Zugfestigkeit annähernd linear elastisch. Kurz vor der Maximallast häufen sich an der Schwachstelle des Querschnittes die Mikrorisse in eine Richtung senkrecht zur äußeren Belastung. Dieser Bereich, in der sich die Rissbildung vollzieht, wird Rissprozesszone genannt. Mit zunehmender Verformung schließen sich immer mehr Mikrorisse zusammen, bis sich schließlich ein diskreter Riss entwickelt. Durch Materialbrücken und Kornverzahnung kann der Riss Spannungen über die Rissufer übertragen. Bei weiterer Verformungszunahme nimmt die aufnehmbare Kraft ab. Gleichzeitig wird die Rissprozesszone kleiner und erreicht beim Entstehen eines diskreten Risses die Ausdehnung Null. Nach Überschreiten der maximalen Spannung gehen die Verformungen im Bereich außerhalb der Rissprozesszone auf Null zurück. Daher ist die Gesamtverformung zunehmend vom Verhalten der Risszone abhängig [TUE97; DUD91].

Für die gesamte Zunahme der Verformung über die Messlänge gilt:

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l + w$$

| | |
|---------------|--|
| l | Messlänge |
| ε | Dehnung der ungestörten Zone |
| w | Mikrorissbildung innerhalb der Rissprozesszone |

Zur Abbildung des Zugtragverhaltens wurde in dem FE-Programm DIANA das Modell nach Hordijk [CHR86] verwendet (siehe Abbildung 4.6). Die Spannungs-Dehnungskurve für den Zugbereich ist wie folgt definiert:

$$\frac{\sigma_{cr}}{f_t} = \begin{cases} \left[1 + \left(c_1 \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{max}} \right)^3 \right]^{-c_2 \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{max}}} - \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{max}} (1 + c_1^3)^{-c_2} & \text{für } 0 < \varepsilon_{cr} < \varepsilon_{max} \\ 0 & \text{für } \varepsilon_{max} < \varepsilon_{cr} < \infty \end{cases} \quad (4.4)$$

Mit

σ_{cr} Rissspannung in Abhängigkeit der Dehnung

ε_{cr} Rissdehnung

f_t Zugfestigkeit

c_1 Konstante $c_1=3,0$

c_2 Konstante $c_2=6,93$

ε_{max} Dehnung, bei der die zugehörige Spannung auf Null abfällt:

$$\varepsilon_{max} = 5,136 \frac{G_f}{h \cdot f_t}$$

G_f Bruchenergie

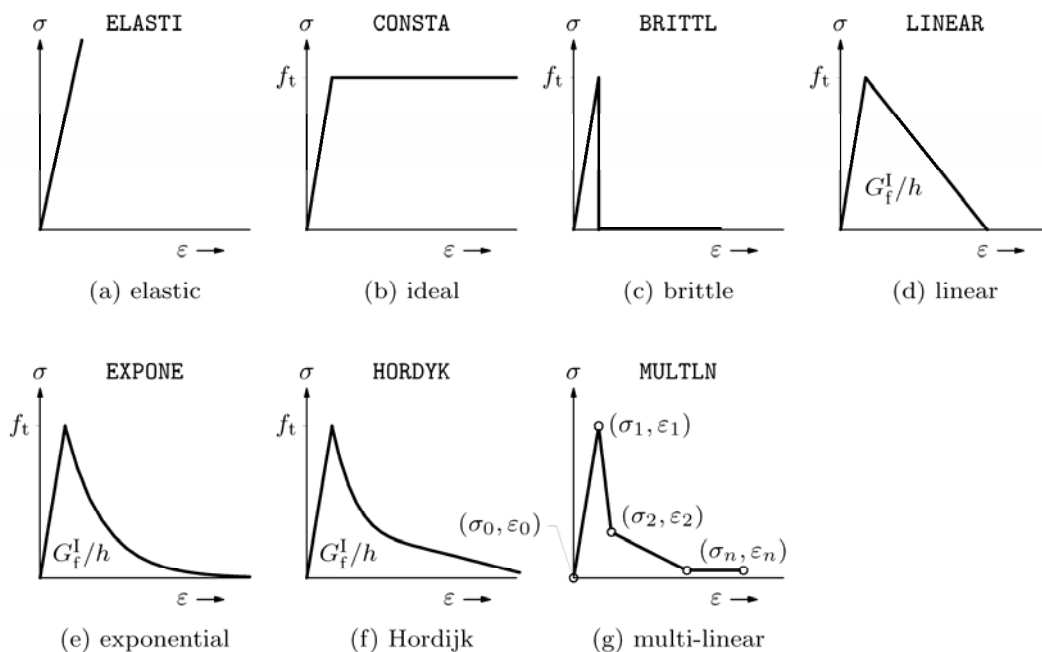


Abbildung 4.6: Materialmodelle in DIANA für den Zugbereich [DIA03]

Anhand des unbewehrten Zugstabes wurde das Modell nach Hordijk getestet und mit Versuchsergebnissen verglichen (siehe Abbildung 4.7). Das Materialverhalten konnte wirklichkeitsgetreu mit Finiten Elementen wiedergegeben werden.

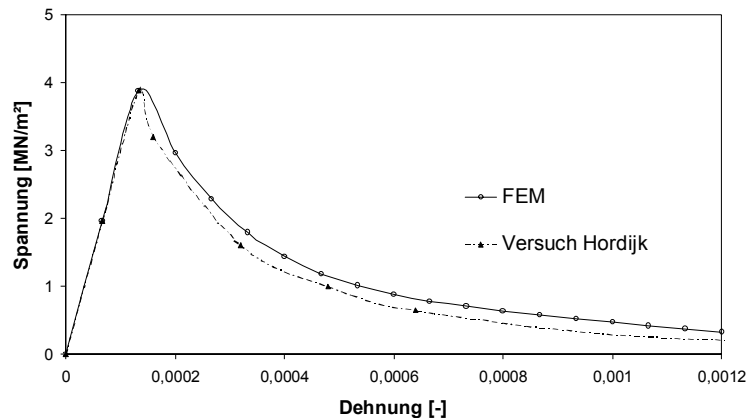


Abbildung 4.7: Vergleich Versuchsergebnisse und FE-Berechnungen anhand eines unbewehrten Zugstabes

Das Verhalten des Betons nach Erreichen der Zugfestigkeit, der sogenannte Tension-Softening-Effekt, wird im Wesentlichen von der Bruchenergie bestimmt.

Anhand des unbewehrten Biegezugbalkens wurde der Einfluss der Bruchenergie auf die Ergebnisse getestet (siehe Abbildung 4.8). Nach Hilsdorf [HIL96] kann mittels des bruchmechanischen Kennwerts G_f der Widerstand von Beton gegen eine Zugbeanspruchung beurteilt werden. Der Beton verhält sich umso zäher, je größer die Bruchenergie bei konstanter Zugfestigkeit ist. Bei einem Versagen im Zugbereich wird die Bruchenergie als die Energie definiert, die notwendig ist, um einen Riss mit Einheitslänge zu erzeugen. Zur Ermittlung der Bruchenergie wird die Fläche unter der Spannungs- Rissöffnungsbeziehung wie folgt bestimmt:

$$G_f = \int_0^{\infty} \sigma(w) dw \quad (4.5)$$

Innerhalb von eigenen FE-Berechnungen wurde die Bruchenergie variiert. In Abbildung 4.8 zeigt sich, dass die Größe der Bruchenergie die Last- Verformungskurve und insbesondere die Versagenslast maßgeblich beeinflusst.

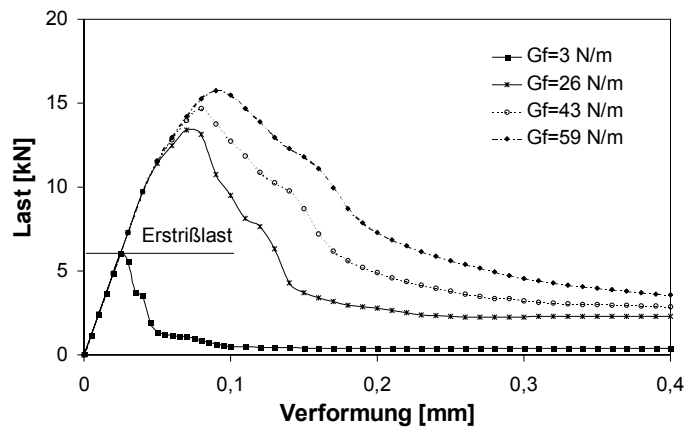


Abbildung 4.8: Last- Verformungskurven des Biegezugbalkens in Abhängigkeit der Bruchenergie G_f

Zur Beschreibung des Verhaltenes von Beton in der Bruchprozesszone existiert zum einen das fiktive Rissmodell (fictitious crack model) als Spannungs-Rissöffnungsbeziehung und zum anderen in der verschmierten Form das Rissbandmodell (crack band model) als Spannungs- Dehnungsbeziehung. Bei dem Rissbandmodell, das von Bazant und Oh [BAOH83] entwickelt wurde, wird die Verformung der Risszone auf eine feste Rissbandbreite h^* verschmiert. Die Dehnungen des Rissbandes ε_R ergeben sich aus:

$$\varepsilon_R = \varepsilon + \frac{w}{h^*} \quad (4.6)$$

Das Softening-Verhalten des Rissbandes kann mit der in Abbildung 4.9 dargestellten Spannungs- Dehnungskurve beschrieben werden. Die Fläche unter der Kurve wurde nach [LIU96] als auf die Rissbandbreite bezogene Oberflächenenergie W definiert. Es gilt:

$$W = \frac{G_f}{h^*} \quad (4.7)$$

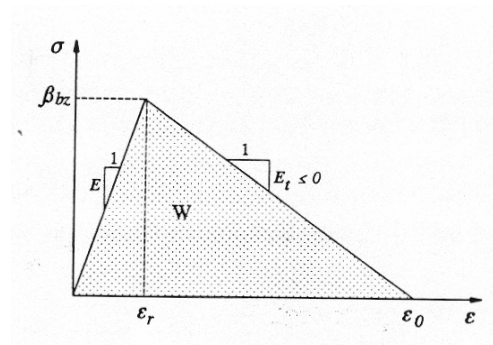


Abbildung 4.9 Spannungs- Dehnungsbeziehung des Rissbands [LIU96]

In der Finite Element Methode wird das Rissbandmodell simuliert, indem die Risse verschmiert über die Elemente abgebildet werden. Nach de Borst [BOR86] treten bei Finite Elemente Berechnungen numerische Schwierigkeiten auf, wenn sich anstelle eines Einzerrisses ein breites Rissband einstellt. Der erste entstandene Riss bekommt die Rissspannungs- Dehnungskurve mit der zugehörigen Bruchenergie zugewiesen. Entsteht ein zweiter Riss, wird auch ihm diese Kurve zugewiesen, d.h. die Bruchenergie wird doppelt verwendet. Dieser Effekt tritt vor allem bei unbewehrten Betonbauteilen mit einem großen Bereich gleich bleibender Spannung auf, wie beispielsweise bei einem unbewehrten Zugstab oder einem unbewehrten Biegezugbalken. Bei den Balken mit Öffnungen treten lediglich in kleinen Bereichen Risse aufgrund der Spannungsspitzen in den Öffnungsecken auf. Aufgrund dieser Spannungsverteilung und der vorhandenen Bewehrung wird der beschriebene Effekt stark abgeschwächt.

Nach Empfehlungen von de Borst [BOR 87] ist eine Spannungs- Dehnungskurve zu verwenden, die die Netzfeinheit und Schubentfestigung berücksichtigt. In den durchgeführten FE-Berechnungen wird daher die gewählte Rissbandweite in Abhängigkeit der Elementgröße mit der Bruchenergie abgestimmt.

4.3.4 Tension-Stiffening-Effekt

Zur Beurteilung der Modellierung von Stahlbeton in DIANA wurden die Versuche nach Empelmann [EMP95] mit Finiten Elementen abgebildet und berechnet. Es handelt sich hierbei um einen bewehrten Zugstab. In Abbildung 4.10 sind die Spannungs-Dehnungsbeziehungen aus den Versuchsdaten den Ergebnissen aus den FE-Berechnungen gegenübergestellt. Im Vergleich hierzu wurde das Materialverhalten von ‚nacktem‘ Stahl dargestellt. Die FE-Berechnungen wurden mit dem Materialmodell nach Hordijk und dem spröden Materialmodell (Brittle) durchgeführt. Die Versuchs-

ergebnisse stimmen gut mit dem Modell nach Hordijk überein. Im Gegensatz zum spröden Modell kann mit dem Modell nach Hordijk der Tension-Stiffening-Effekt abgebildet werden.

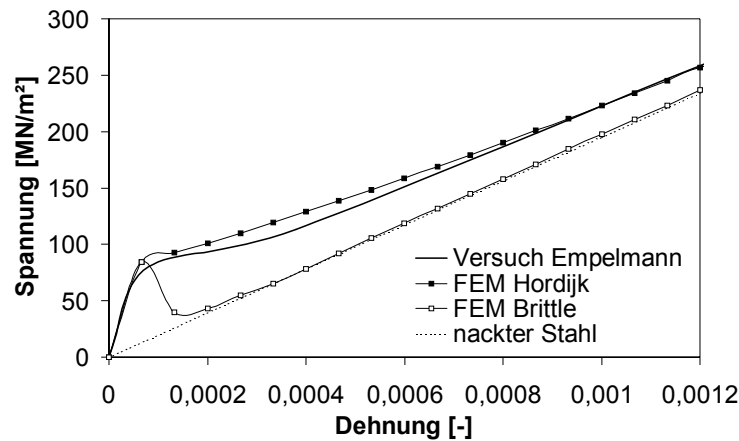


Abbildung 4.10: Vergleich der FE-Berechnung und der Versuchsergebnisse nach Empelmann

4.3.5 Betonstahl

Betonstahl verhält sich unter Druck und Zug gleich. Während der warmverformte Betonstahl nach Erreichen der Fließgrenze ein fließähnliches Plateau besitzt, bildet sich bei dem kaltverformten Stahl keine echte Fließgrenze aus.

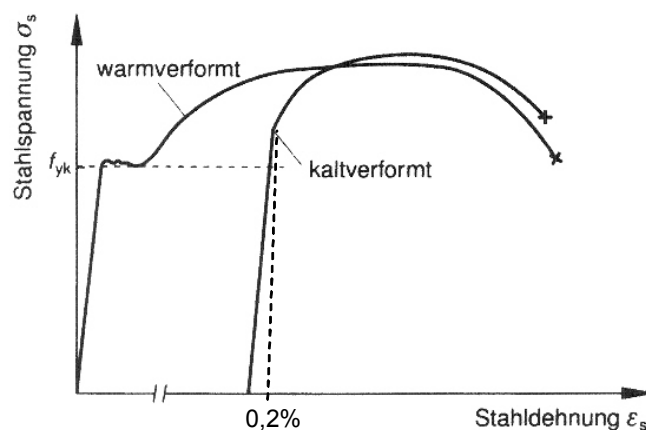


Bild 2.8: Verhalten des warm- und kaltverformten Betonstahls nach [TUE97]

Zur Beurteilung des Betonstahls werden nach [TUE97] folgende Kenngrößen herangezogen:

- Fließgrenze f_y bzw. für den kaltverformten Stahl $f_{0,2\%}$
- Zugfestigkeit f_t
- Verhältnis zwischen Fließgrenze und Zugfestigkeit (f_t/f_y)
- Charakteristischer Wert der Dehnung bei Höchstlast
- Elastizitätsmodul
- Bezogene Rippenfläche f_r

Für FE-Berechnungen können Bewehrungsstäbe auf zwei verschiedene Arten idealisiert werden:

1. Die Bewehrung wird über die Elementfläche verschmiert angesetzt, d.h. die Steifigkeitsanteile von Beton und Stahl werden innerhalb eines Elementes addiert. Dieses wird bei den folgenden FE-Berechnungen angewandt.
2. Die Bewehrung wird diskret modelliert und dann mit Hilfe von Kontaktelementen mit den Betonelementen verbunden.

Anhand von Zugversuchen werden die Materialeigenschaften der in den Versuchen eingesetzten Bewehrung bestimmt (siehe Tabelle 4.1). Die Ergebnisse werden bei der Modellierung des Stahls in DIANA verwendet. Gewählt wird das Plastizitätsmodell nach Von Mises. Die Spannungs- Dehnungskurve ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

Tabelle 4.1: Werkstoffkennwerte des in den Versuchen verwendeten Stabstahls

| Durchmesser [mm] | Streckgrenze f_{yk} [N/mm ²] | Zugfestigkeit f_{tk} [N/mm ²] |
|---------------------|---|--|
| 10 | 583 | 627 |
| 12 | 552 | 622 |
| 20 | 533 | 605 |

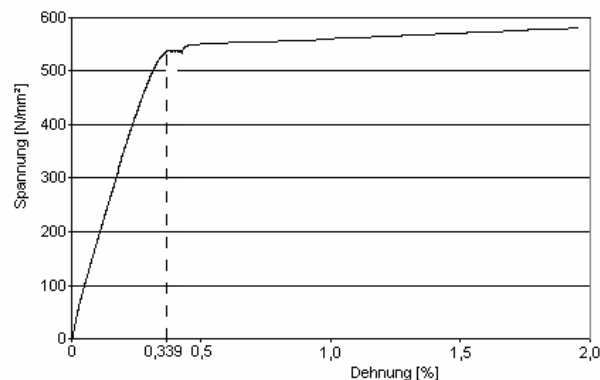


Abbildung 4.11: Spannungs- Dehnungsdiagramm des modellierten Betonstahls

4.3.6 Verbund zwischen Beton und Stahl

Bei dem Ansatz der ‚verschmierten Bewehrung‘ wird der Verbund zwischen Beton und Stahl als starr angenommen. Für Untersuchungen des Trag- und Verformungsverhaltens von Trägern mit Öffnungen ist auf der Makroebene die Modellierung eines starren Verbundes ausreichend. Daher wurde unter Berücksichtigung des Tension Stiffening Effektes für sämtliche FE-Berechnungen der Verbund zwischen Beton und Stahl als starr angenommen.

Um das Verbundverhalten wirklichkeitsnah abzubilden, werden zusätzlich Untersuchungen mit diskret abgebildeter Bewehrung durchgeführt. Für die Verbundelemente zwischen Beton und Stahl stehen in DIANA zwei Materialmodelle zur Verfügung. In diesen Modellen wird die relative Verschiebung zwischen Beton und Stahl beschrieben. Die Beziehung zwischen Normalspannung und der zugehörigen relativen Verschiebung wird als linear-elastisch definiert, während die Beziehung zwischen Schubspannungen und Schlupf durch eine nichtlineare Funktion beschrieben wird. Untersucht werden die kubische Funktion nach Dörr [DOE74] und die Beziehung nach Noakowski [NOA78]. Die Ergebnisse der diskreten Modellierung sind in Kapitel 5.4.1 aufgeführt.

4.3.7 Fazit

Die Voruntersuchungen haben ergeben, dass sowohl der Zug- als auch der Druckbereich von Beton wirklichkeitsgetreu mit den gewählten Materialmodellen in DIANA abgebildet werden kann. Die untersuchten Materialmodelle werden für alle weiteren FE-Berechnungen verwendet.

Kapitel 5

Auswertung und Interpretation der numerischen Berechnungen

5.1 Vorgehensweise

Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonträgern mit Öffnungen wurde bereits innerhalb der Versuchsserie untersucht (siehe Kapitel 3). Zunächst werden die Versuche mit Hilfe der Finite Elemente Methode abgebildet. Im nächsten Schritt sollen durch eine umfangreiche Parameterstudie die Untersuchungen auf Träger mit Öffnungsgruppen und vorgespannte Träger mit Öffnungen erweitert werden. Im Vorfeld wurde bereits eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, um die gewählten Modellannahmen und Materialmodelle zu überprüfen. Hierbei wurden Versuche aus der Literatur mit der Methode der Finiten Elemente simuliert. Im Anschluss konnten innerhalb der Parameterstudien die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Trag- und Verformungsverhalten herausgearbeitet werden [NEF05].

5.2 Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen

5.2.1 Verifikation der Versuche

In den folgenden Unterkapiteln werden die Versuchsergebnisse aus Kapitel 3.6 den Ergebnissen der nichtlinearen FE-Berechnungen gegenübergestellt und bewertet. Hintergründe zur Modellierung der Versuchskörper wurden bereits in Kapitel 4.2 erläutert. Die verwendeten Materialmodelle sind in Kapitel 4.3 dargestellt. Der

entwickelte Versuchsaufbau aus der Versuchsserie wurde auch für die numerische Verifikation verwendet, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das statische System und das gewählte FE-Netz sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

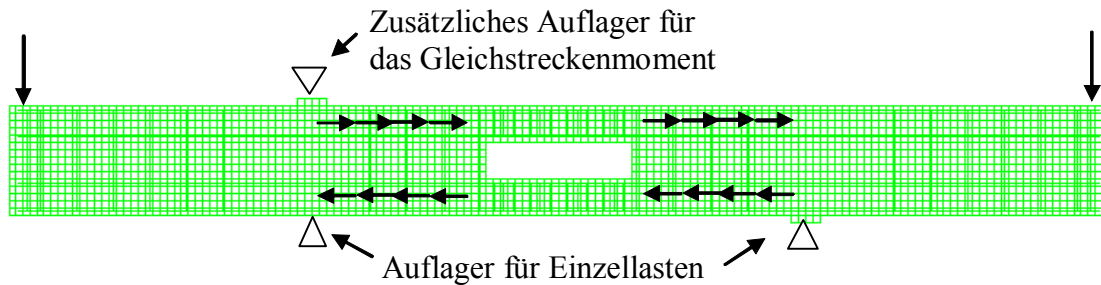


Abbildung 5.1: Finite Elemente Netz

5.2.2 Traglast

Die Versagenslasten aus der Versuchsserie und aus den nichtlinearen FE-Berechnungen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Auch die Lage des ersten Fließgelenkes wird jeweils gegenübergestellt. Die Bezeichnung der Fließgelenke ist in Abbildung 3.18 dargestellt.

Tabelle 5.1: Vergleich der Versagenslast und der Lage des ersten Fließgelenkes

| Nr. | FE-Berechnungen | | Versuchsdaten | | Abweichungen FEM zu Versuchsdaten | |
|-----|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
| | Querkraft beim 1. Fließgelenk [kN] | Lage des 1. FG | Querkraft beim 1. Fließgelenk [kN] | Lage des 1. FG | Querkraft | Lage des 1. FG |
| E8 | 109,0 | T2 | 109,0 | T2 | 0% | identisch |
| E9 | 108,0 | T2 | 105,0 | T2 | 3% | identisch |
| E13 | 99,0 | T2 | 110,0 | T2 | 11% | identisch |
| E19 | 112,0 | T2, C4 und C3 | 103,0 | C3 | 9% | identisch |
| E27 | 76,5 | T2 | 64,0 | T2 | 20% | identisch |
| E45 | 121,5 | T1 | 111,0 | T1 und T2 | 9% | identisch |

Insgesamt lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den FE-Berechnungen und den Versuchsergebnissen feststellen. Die Lage des ersten Fließgelenkes stimmt bei

jedem Versuchsträger mit der zugehörigen FE-Berechnung überein. Auch die Abweichungen bei den Versagenslasten der Träger E8 und E9 sind gering. Die Abweichungen der anderen Versuchskörper sind durch die Besonderheiten des Versuchsaufbaus zu erklären. Durch die sensibel reagierende Wippenkonstruktion während der Versuchsdurchführung wurde die Laststeigerung häufig unterbrochen, wie beispielsweise bei Träger E27. Bei der erneuten Laststeigerung war dieser Träger somit schon vorgeschädigt und versagte daher früher.

Innerhalb der Versuchsserie entsteht der Unterschied in der Größe der Versagenslasten zwischen Träger E27 und den restlichen Trägern durch die größere Öffnungslänge des Trägers E27. Dadurch ergeben sich größere Sekundärmomente. Diese erhöhte Beanspruchung führt zu einer kleineren Versagenslast im Vergleich zu den Trägern mit einer Öffnungslänge von 80 cm.

5.2.3 Querkraftverteilung

Die Ermittlung der Querkraftverteilung aus den Versuchsergebnissen ist bereits in Kapitel 3.6.3.1 dargestellt. Bei den nichtlinearen FE-Berechnungen werden die Schubspannungen in den Gauss-Integrationspunkten berechnet. Pro Element sind neun Gauss-Integrationspunkte vorhanden, um eine vollständige Integration zu erzielen [BAT86]. Die Schubspannungen werden in Abhängigkeit der Lage des Gauss-Integrationspunktes gewichtet (siehe Abbildung 5.2) und über die Querschnittsfläche des jeweiligen Gurtes aufintegriert.

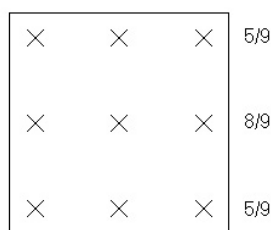


Abbildung 5.2: Gewichtung der Gauss-Integrationspunkte in einem vierseitigen Element mit acht Knotenpunkten für eine 3x3 Integration

Die Querkraft in den jeweiligen Gurten berechnet sich zu:

$$V_{c,t} = \sum_{i=1}^{3 \cdot n} \frac{\kappa \cdot \sigma_{i_{c,t}} \cdot A_{c,t}}{2 \cdot n} \quad (5.1)$$

$V_{c,t}$ Querkraft im Druck- bzw. Zuggurt

$\sigma_{i_{c,t}}$ Schubspannungen in den Gauss-Integrationspunkten

$A_{c,t}$ Querschnittsfläche des Druck- bzw. Zuggurtes

n Anzahl der Elemente je Gurt

κ Wichtungsfaktor nach Abbildung 5.2

In Abbildung 5.3 bis Abbildung 5.8 sind die Versuchsdaten den Ergebnissen aus den nichtlinearen FE-Berechnungen gegenübergestellt.

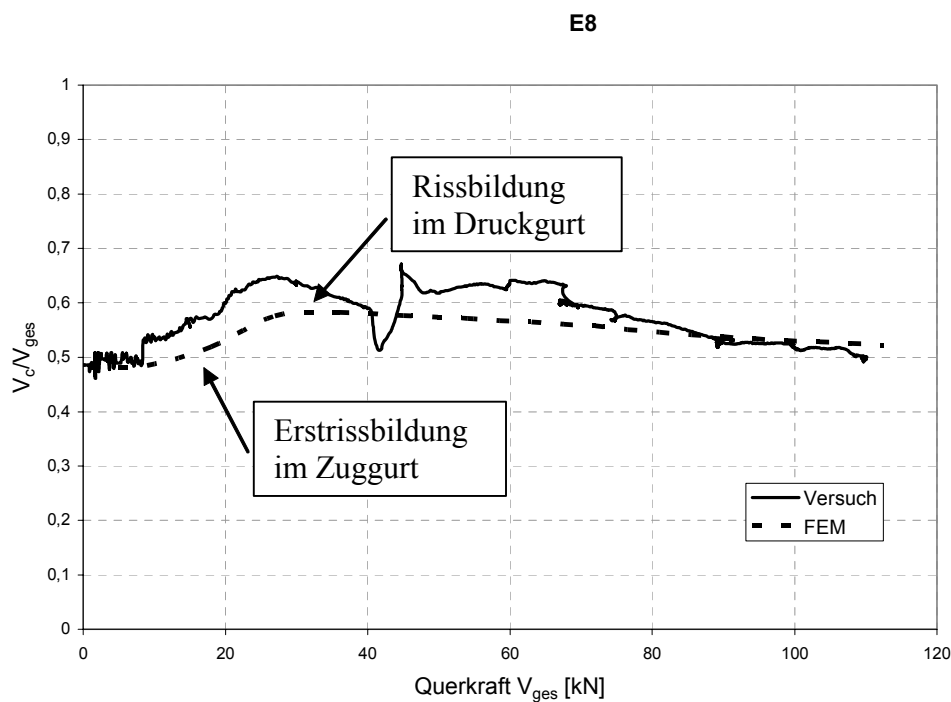
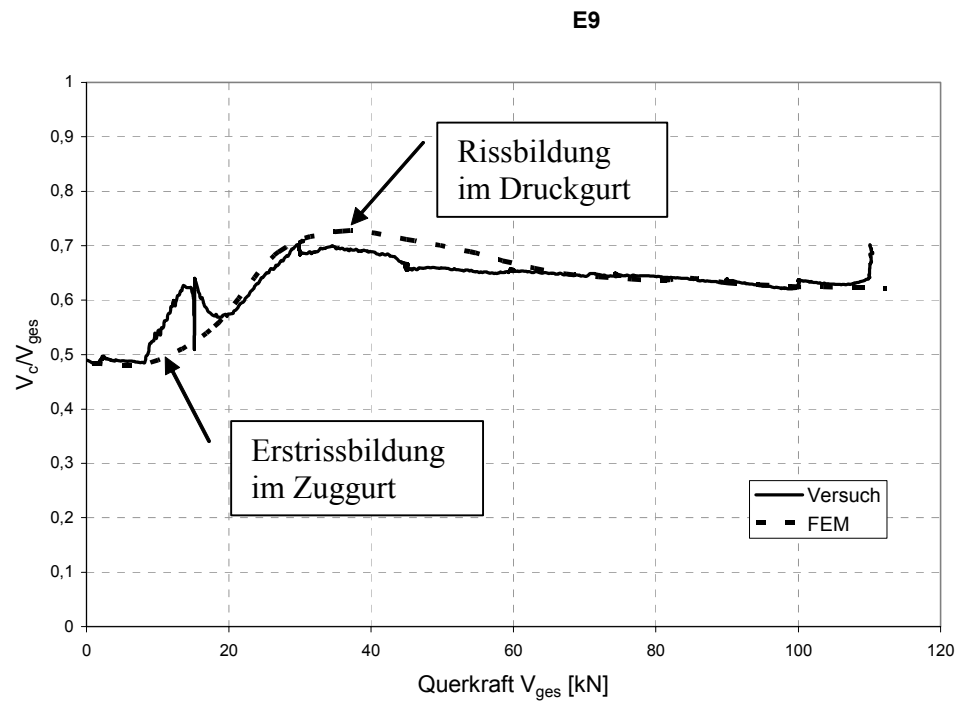
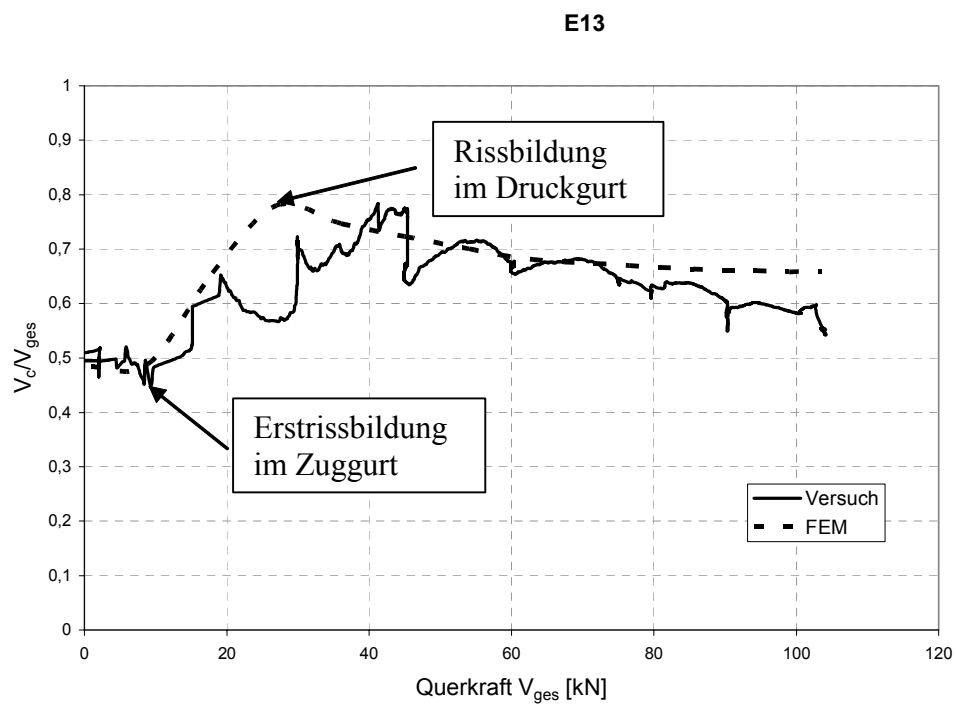


Abbildung 5.3: Querkraftverteilung des Trägers E8, $M/V = 0,5$ m

Abbildung 5.4: Querkraftverteilung des Trägers E9, $M/V = 1,0$ mAbbildung 5.5: Querkraftverteilung des Trägers E13, $M/V = 1,5$ m

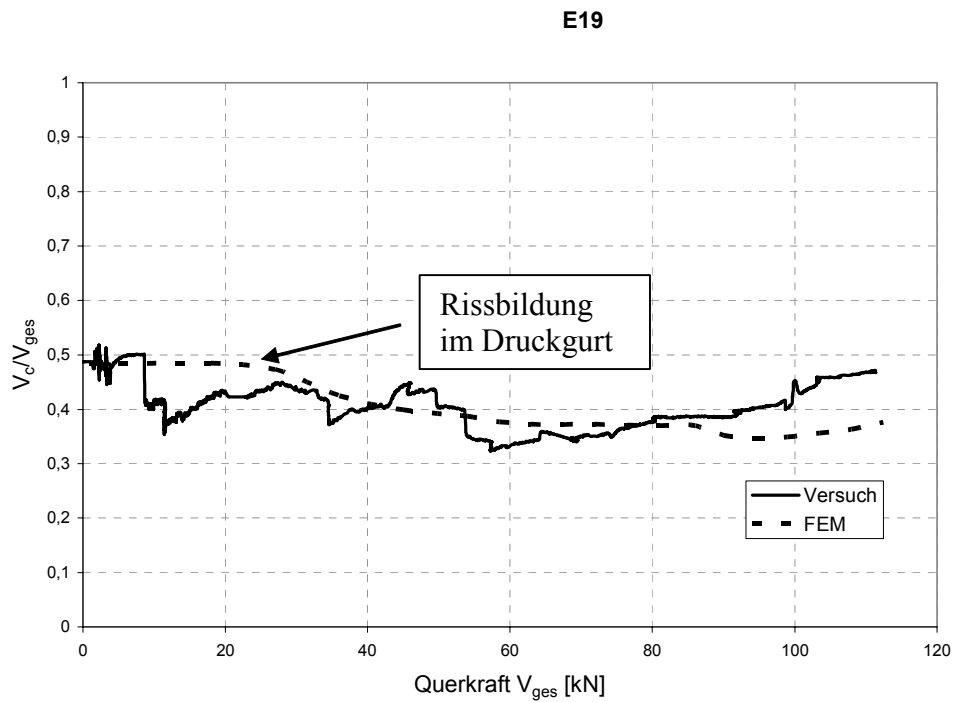


Abbildung 5.6: Querlastverteilung des Trägers E19, $M/V = 0,0$ m

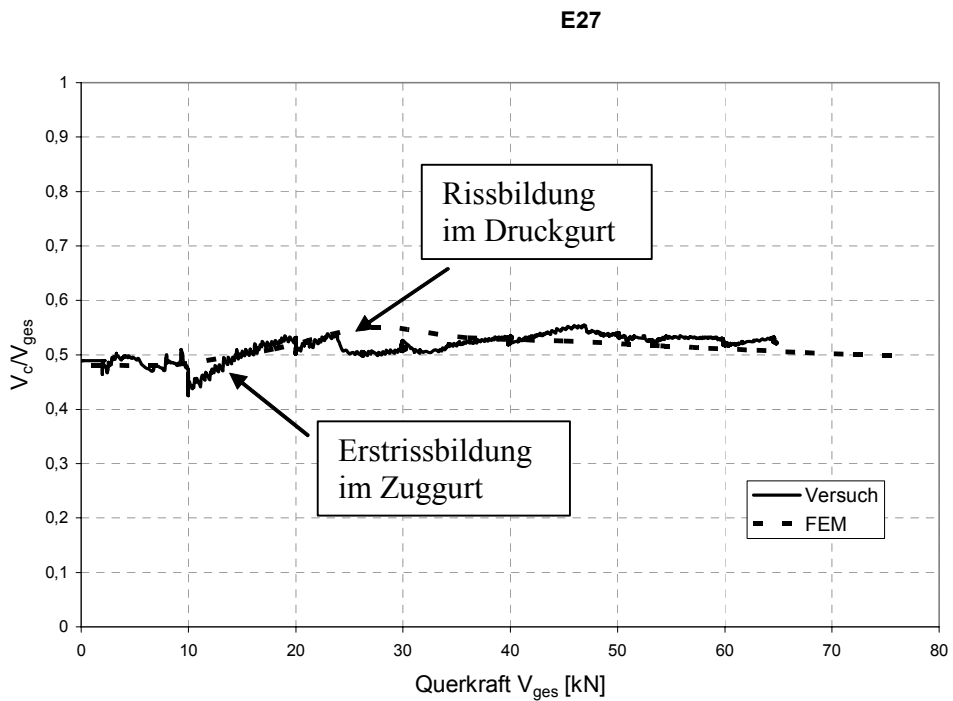


Abbildung 5.7: Querlastverteilung des Trägers E27, $M/V = 0,5$ m, Öffnungslänge 110 cm

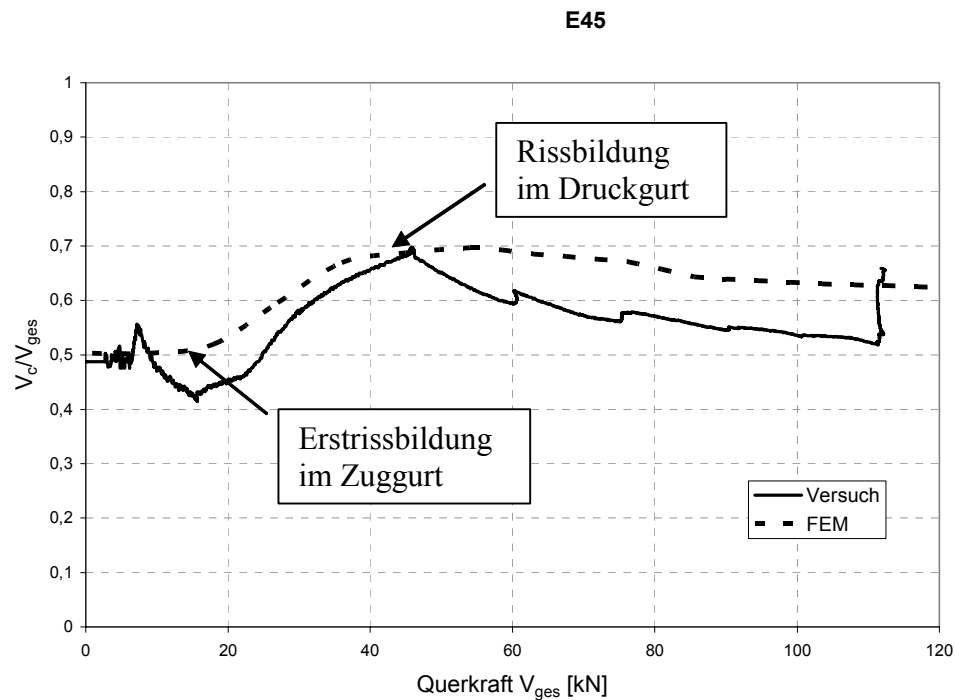


Abbildung 5.8: Querkraftverteilung des Trägers E45, $M/V = 0,5$ m, symmetrische Bewehrung im Druck- und Zuggurt

Bei allen Versuchsträgern verteilt sich die Querkraft bis zur Erstrissbildung in Abhängigkeit der ideellen Steifigkeiten der Gurte. Da der Zuggurt zur Aufnahme des globalen Biegemomentes stärker bewehrt ist, ergibt sich unter der Annahme eines konstanten Elastizitätsmoduls ein Querkraftanteil im Druckgurt V_c zu:

$$\frac{V_c}{V_c + V_t} = \frac{I_{i,c}}{I_{i,c} + I_{i,t}} \quad (5.2)$$

Die ideellen Flächenträgheitsmomente berechnen sich zu:

$$I_{i,t} = I_t + (n-1) \cdot (A_{s1} \cdot z_{s1}^2 + A_{s2} \cdot z_{s2}^2) \quad (5.3)$$

$$I_{i,c} = I_c + (n-1) \cdot (A_{s3} \cdot z_{s3}^2 + A_{s4} \cdot z_{s4}^2) \quad (5.4)$$

In Tabelle 5.2 sind die Querkraftanteile im Druckgurt aus der Versuchsserie und den FE-Berechnungen mit den ermittelten Werten aus Gleichung 5.2 für den Fall

gegenübergestellt, dass sich die Versuchsträger noch im Zustand I befinden. Die Ergebnisse aus der Versuchsserie stellen Mittelwerte dar, da sich aufgrund der im Anfangsstadium sehr kleinen Messwerte Schwankungen ergeben. Messungenauigkeiten wirken sich in diesem Stadium sehr stark aus.

Tabelle 5.2: Querkraftanteile im Druckgurt im Zustand I

| Träger | Versuchsserie | FE-Berechnung | Handrechnung |
|--------|---------------|---------------|--------------|
| E8 | ca. 0,5 | 0,48 | 0,47 |
| E9 | ca. 0,49 | 0,48 | 0,47 |
| E13 | ca. 0,5 | 0,48 | 0,47 |
| E19 | ca. 0,48-0,5 | 0,48 | 0,47 |
| E27 | ca. 0,49 | 0,48 | 0,47 |
| E45 | ca. 0,48 | 0,5 | 0,5 |

Innerhalb dieser Arbeit ist es erstmalig gelungen, eine versuchstechnisch ermittelte Querkraftverteilung mit Hilfe der Finite Elemente Methode zu verifizieren. Für die Querkraftverteilung ergeben sich insgesamt zufriedenstellende Übereinstimmungen zwischen den Versuchsergebnissen und den FE-Berechnungen.

5.2.4 Lage des Momentennullpunkts

In Kapitel 3.6.4 wurden bereits die Exzentrizitäten l_E des Momentennullpunktes (siehe Abbildung 5.9) für die Versuchsserie dargestellt. Diese werden den Ergebnissen der FE-Berechnungen gegenübergestellt (siehe Tabelle 5.3).

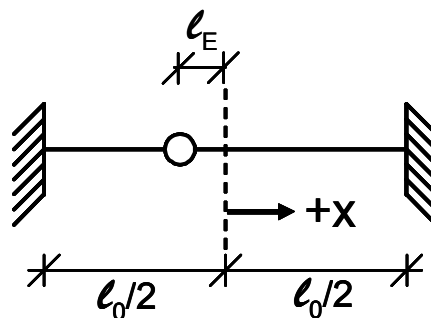


Abbildung 5.9: Exzentrizität des Momentennullpunktes im Gurt

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der Exzentrizitäten aus den FE-Berechnungen und den Versuchsergebnissen

| Nr. | l_0 [cm] | Exzentrizität [cm] | | | |
|-----|---------------|--------------------|-----------|---------------|-----------|
| | | Versuch | | FE-Berechnung | |
| | | Zuggurt | Druckgurt | Zuggurt | Druckgurt |
| E8 | 80 | -7,20 | 1,00 | -12,50 | 0,30 |
| E9 | 80 | -16,80 | - | -16,70 | -2,70 |
| E13 | 80 | -17,10 | -9,00 | -16,70 | -8,30 |
| E19 | 80 | -3,50 | - | -4,80 | 2,60 |
| E27 | 110 | -21,50 | 1,50 | -13,30 | 1,70 |
| E45 | 80 | -7,20 | 0 | -6,70 | -1,70 |

Die aus den Versuchen gewonnen Exzentrizitäten zeigen sehr gute Übereinstimmungen mit den Exzentrizitäten aus den FE-Berechnungen. Die Exzentrizität des Momentennullpunktes wird ins Verhältnis zur Öffnungslänge gesetzt, um die Vergleichbarkeit innerhalb der Versuchsserie zu gewährleisten (siehe Abbildung 5.10). Es lässt sich feststellen, dass die Exzentrizitäten im Druckgurt kleiner sind als die Exzentrizitäten im Zuggurt. Die größten Exzentrizitäten werden bei einem größeren M/V-Verhältnis erzielt. Die maximale Exzentrizität beträgt im Zuggurt ca. 22% bezogen auf die Öffnungslänge.

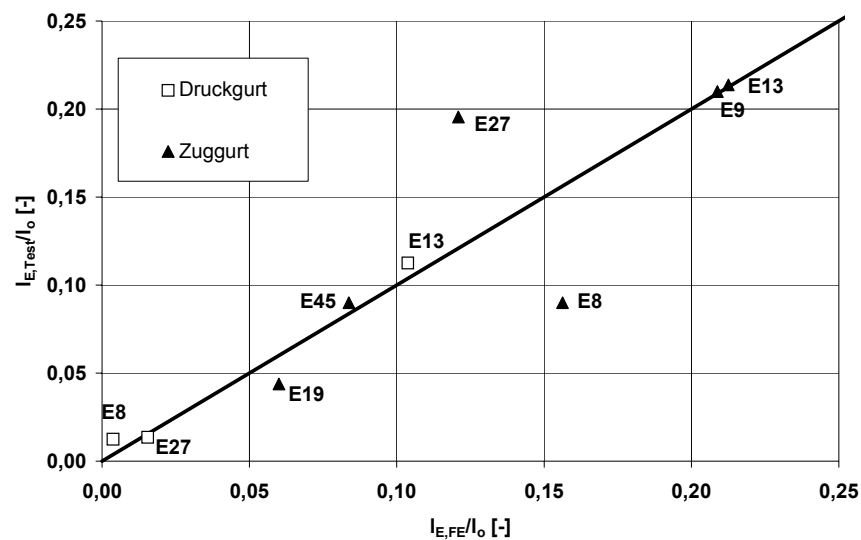


Abbildung 5.10: Gegenüberstellung der Exzentrizitäten aus den FE-Berechnungen und den Versuchsergebnissen bezogen auf die Öffnungslänge

5.3 Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen

5.3.1 Voruntersuchungen

Im Folgenden werden die Auswirkungen einer Öffnungsgruppe auf das Trag- und Verformungsverhalten eines Stahlbetonträgers untersucht. Um die gewählten Materialmodelle in DIANA speziell für Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen zu verifizieren, erfolgten zunächst Voruntersuchungen, in denen Versuche aus der Literatur nachgerechnet wurden. Twelmeier [TDF85] führte drei Versuche an Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen durch. In Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 ist der Versuchsträger LT3 abgebildet, welcher eine unterschiedliche Bewehrungsführung auf beiden Seiten des Trägers aufweist.

Die Gegenüberstellung der Rissbilder aus [TDF85] und der FE-Berechnung ergibt eine gute Übereinstimmung (vgl. Abbildung 5.13). Sowohl die Biegerisse als auch die Risse infolge der Spannungsspitzen in den Öffnungsecken können mit dem FE-Programmsystem DIANA zufriedenstellend abgebildet werden.

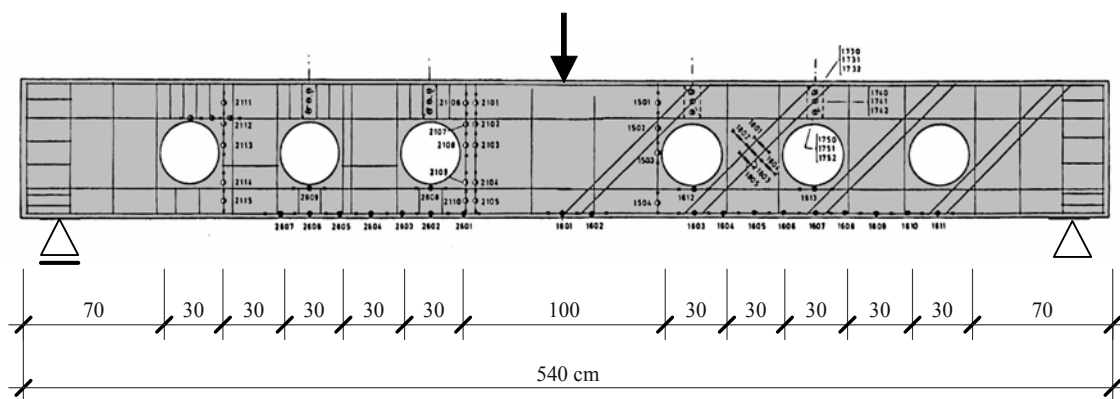


Abbildung 5.11: Statisches System mit Bewehrung [TDF85]

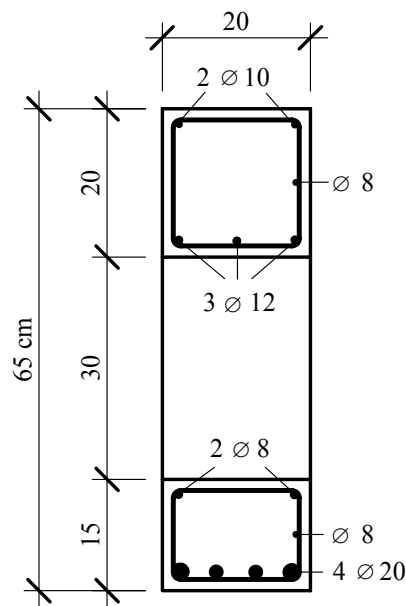


Abbildung 5.12: Querschnitt im Bereich der Öffnung

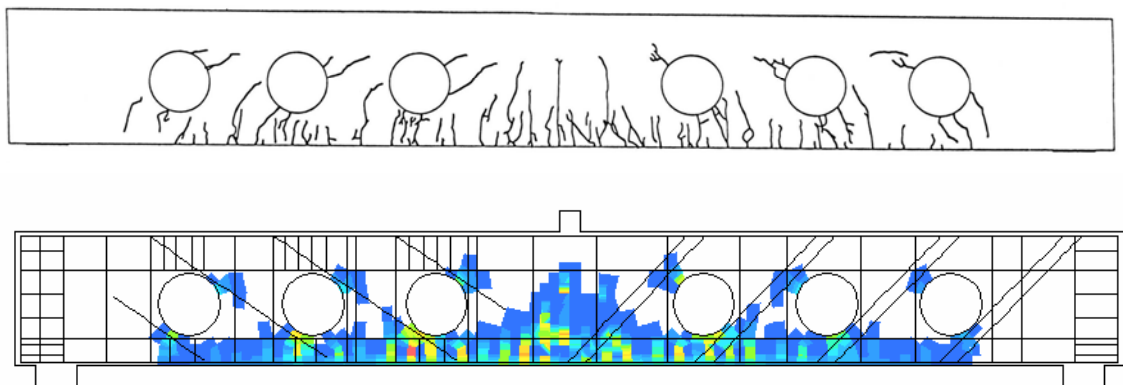


Abbildung 5.13: Vergleich der Rissbilder aus [TDF85] und der eigenen FE-Berechnungen

Auch die Gegenüberstellung der Last-Verformungskurven aus den Versuchen von Twelmeier und den eigenen FE-Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung (siehe Abbildung 5.14). Insgesamt verhält sich die Kurve aus der FE-Berechnung im Bereich vor dem Versagen etwas zu steif. Die Versagenslasten sind jedoch wiederum nahezu identisch.

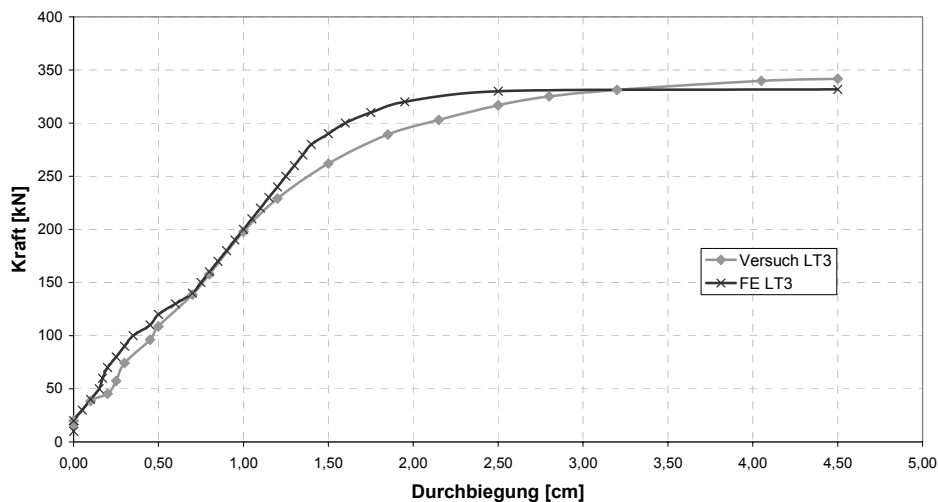


Abbildung 5.14: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse aus [TDF85] mit den eigenen FE-Berechnungen

In Abbildung 5.15 sind die Dehnungen in der Aufhängebewehrung direkt neben den Öffnungen aus den Versuchen nach Twelmeier [TDF85] und aus den FE-Berechnungen abgebildet. Sowohl innerhalb der Versuchserie von Twelmeier als auch bei den FE-Berechnungen konnte eine ähnliche Kräfteentwicklung in den Bügeln beobachtet werden. Befindet sich der Träger im Zustand I, sind die Kräfte in den Bügeln vernachlässigbar klein. Erwartungsgemäß steigen die Kräfte in den Bügeln an, wenn sich Risse bilden, bis sich schließlich ein Fließplateau ausbildet.

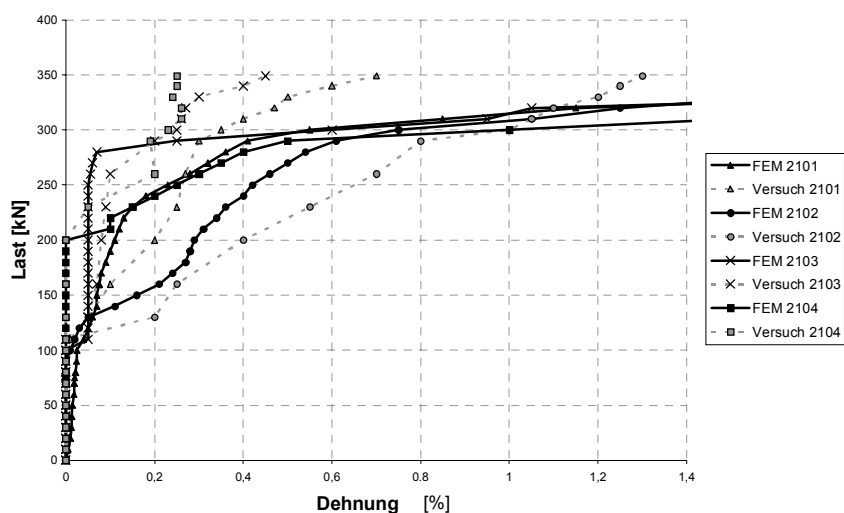


Abbildung 5.15: Gegenüberstellung der Dehnungen in der Bügelbewehrung

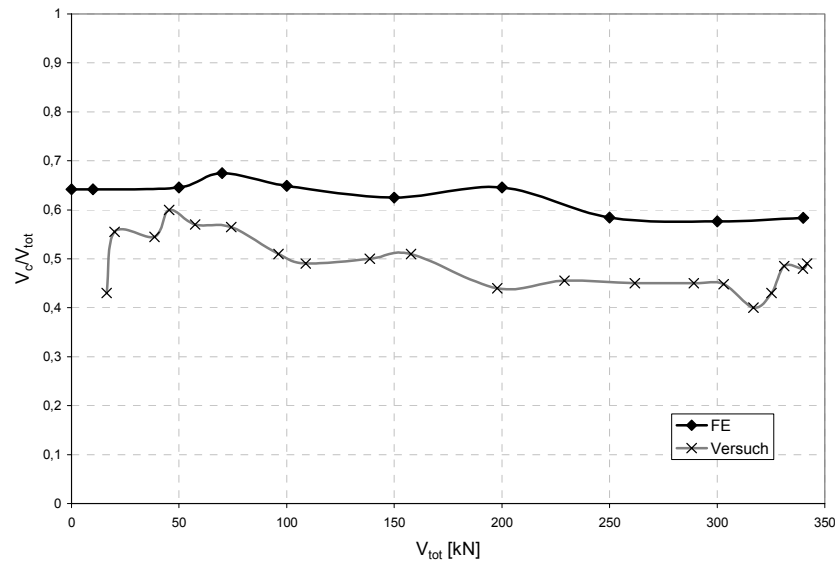


Abbildung 5.16: Querkraftverteilung – Versuche nach [TDF85] und eigene FE-Berechnung

Die Querkraftverteilung aus der FE-Berechnung ist insgesamt um ca. 30% größer als die Querkraftverteilung aus den Versuchsergebnissen (siehe Abbildung 5.16). Um die unterschiedlichen Ergebnisse besser einschätzen zu können, wird die Querkraftverteilung im Zustand I anhand des Verhältnisses der ideellen Biegesteifigkeiten der Öffnungsgurte ermittelt. Da der Elastizitätsmodul konstant ist, wird das Verhältnis aus den ideellen Flächenträgheitsmomenten gebildet.

$$\begin{aligned}
 I_{i,t} &= I_t + (n-1) \cdot (A_{s1} \cdot z_{s1}^2 + A_{s2} \cdot z_{s2}^2) \\
 &= \frac{20^3 \cdot 20}{12} + (6,48-1) \cdot (1,51 \cdot 7,0^2 + 1,01 \cdot 7,0^2) = 14051 \text{ cm}^4
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

$$\begin{aligned}
 I_{i,c} &= I_c + (n-1) \cdot (A_{s3} \cdot z_{s3}^2 + A_{s4} \cdot z_{s4}^2) \\
 &= \frac{15^3 \cdot 20}{12} + (6,48-1) \cdot (1,01 \cdot 5,0^2 + 12,57 \cdot 5,0^2) = 7608 \text{ cm}^4
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

$$\text{Mit } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{29230} = 6,84
 \tag{5.7}$$

Mit den berechneten Flächenträgheitsmomenten ergibt sich der Querkraftanteil im Druckgurt für den Zustand I wie folgt:

$$\frac{V_c}{V_{\text{tot}}} = \frac{I_{i,c}}{I_{i,c} + I_{i,t}} = \frac{14051}{14051 + 7608} = \underline{\underline{0,648}} \quad (5.8)$$

Aufgrund der größeren Höhe des Druckgurts ergibt sich für den Zustand I somit ein Querkraftanteil im Druckgurt von 64,8% der Gesamtquerkraft. Für den Bereich bis zur Erstrissbildung stimmt dieser Wert gut mit der Querkraftverteilung aus der FE-Berechnung überein ($V_c/V_{\text{tot}} = 0,64$). Die Abweichung liegt bei 1%. Der Anteil der Querkraft im Druckgurt, welcher von Twelmeier [TDF85] aus den Versuchsergebnissen berechnet wurde, ist mit 42% jedoch deutlich zu niedrig. D.h., die Querkraftverteilung konnte von Twelmeier innerhalb des Versuches nicht messtechnisch erfasst werden.

5.3.2 Parameterstudie

Um den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Trag- und Verformungsverhalten detailliert zu untersuchen, wurden folgende Größen variiert:

- Anzahl der Öffnungen
- Abstände der Öffnungen untereinander
- Lage der Öffnungen (M/V-Verhältnis)
- Geometrie der Öffnungen
- Größe der Längs- und Aufhängebewehrung

Die Auflistung der berechneten Träger erfolgt im Anhang B, Tabelle B.1. Innerhalb der Serie T wurden 52 Stahlbetonträger untersucht. Die Serie MV beinhaltet zusätzlich 21 Träger, um zu gewährleisten, dass bei Variation der Öffnungsgröße bzw. des Öffnungsabstandes Ergebnisse für Öffnungen mit gleichem M/V-Verhältnis vorliegen (siehe Anhang B, Tabelle B.2). Die prinzipielle Bewehrungsführung aus Abbildung 5.17 ist für sämtliche Berechnungen der Serie T und der Serie MV zutreffend.

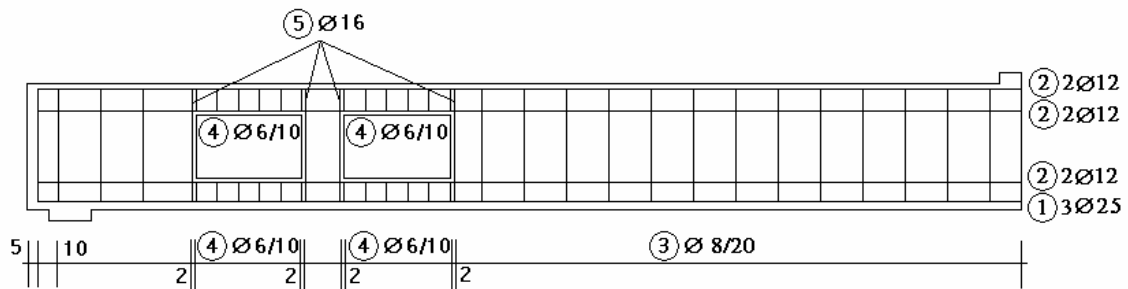


Abbildung 5.17: Bewehrungsskizze

Das statische System mit dem Finite Elemente Netz ist am Beispiel eines Trägers mit vier rechteckigen Öffnungen in Abbildung 5.18 dargestellt. Um die Rechenzeit zu minimieren, wurden die Symmetrieeigenschaften ausgenutzt, so dass nur die Hälfte des Systems abgebildet wurde.

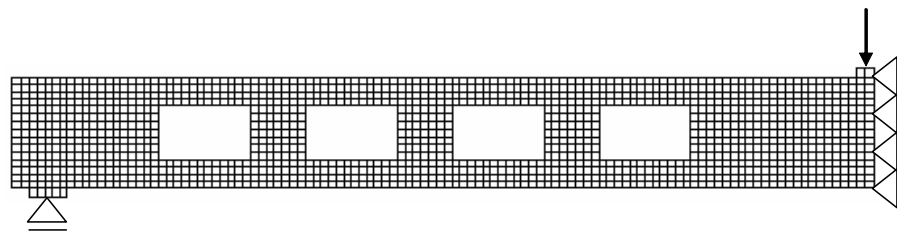


Abbildung 5.18: Statisches System mit FE-Netz

Die Trägerlänge der Träger T1 bis T12 beträgt 5,4 m (siehe Abbildung 5.19). Um eine größere Anzahl von Öffnungen und Öffnungen mit größeren Abmessungen innerhalb einer Öffnungsgruppe zu untersuchen, wurde die Trägerlänge für die Träger T13 bis T52 auf 9,0 m vergrößert (siehe Abbildung 5.20). Für beide Trägerlängen wurde jeweils ein Stahlbetonträger mit Massivquerschnitt als Referenzträger modelliert und ausgewertet.

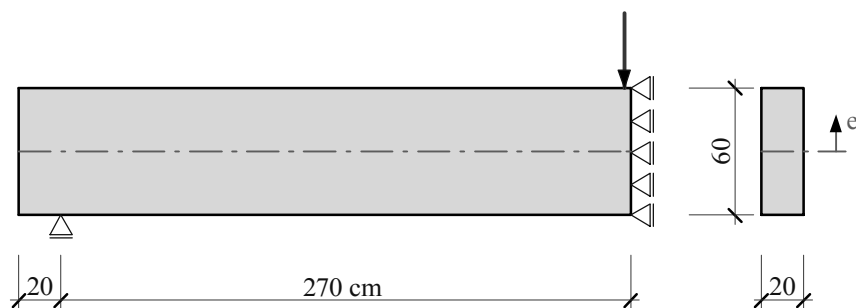


Abbildung 5.19: Statisches System und Geometrie der Serie T1 bis T12

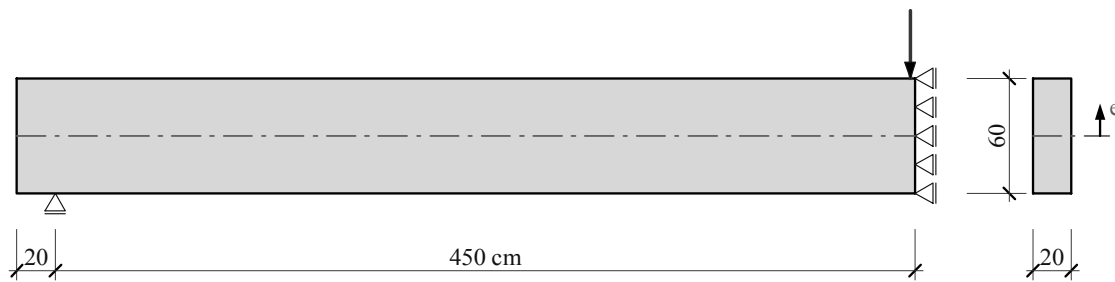


Abbildung 5.20: Statisches System und Geometrie der Serie T13 bis T52

5.3.3 Auswertung der Finite Elemente Berechnungen

5.3.3.1 Übersicht der Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der FE-Berechnungen für Stahlbetonträger mit Einzelöffnungen (Serie T) sind zum besseren Überblick in Tabelle 5.4 zusammengestellt. Hierbei werden unter anderem die Versagenslasten aufgeführt. Der Querkraftanteil im Druckgurt wird kurz vor dem Versagenszeitpunkt für jede einzelne Öffnung innerhalb einer Öffnungsgruppe ausgewertet. Die Nummerierung der Öffnungen beginnt mit der Öffnung, die das kleinste M/V -Verhältnis besitzt. Das jeweilige M/V -Verhältnis ist in Anhang B, Tabelle B.1 aufgetragen.

Der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Trag- und Verformungsverhalten wird in den folgenden Kapiteln eingehender untersucht.

Tabelle 5.4: Übersicht der Ergebnisse Serie T

| Nr. | Länge [m] | Öffnungsgeometrie | Ergebnisse | | | | | | |
|-----|--------------|--|-------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | | Anzahl / Länge / Höhe / Abstand [cm] | Versagens- last [kN] | V_o/V_{tot} für Öffnung Nr. | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| T0a | 5,4 | - | 252,0 | - | - | - | - | - | - |
| T1 | 5,4 | 1 / 20 / 20 / - | 252,0 | 0,54 | - | - | - | - | - |
| T2 | 5,4 | 2 / 20 / 20 / 20 | 250,4 | 0,56 | 0,58 | - | - | - | - |
| T3 | 5,4 | 3 / 20 / 20 / 20 | 250,4 | 0,53 | 0,54 | 0,57 | - | - | - |
| T4 | 5,4 | 2 / 20 / 20 / 12 | 250,0 | 0,68 | 0,48 | - | - | - | - |
| T5 | 5,4 | 3 / 20 / 20 / 12 | 248,2 | 0,75 | 0,67 | 0,41 | - | - | - |
| T6 | 5,4 | 2 / 20 / 20 / 8 | 246,0 | 0,47 | 0,71 | - | - | - | - |
| T7 | 5,4 | 3 / 20 / 20 / 8 | 243,0 | 0,75 | 0,70 | 0,45 | - | - | - |
| T8 | 5,4 | 1 / 28 / 20 / - | 252,0 | 0,57 | - | - | - | - | - |
| T9 | 5,4 | 2 / 28 / 20 / 20 | 251,6 | 0,58 | 0,56 | - | - | - | - |
| T10 | 5,4 | 3 / 28 / 20 / 20 | 248,8 | 0,58 | 0,56 | 0,56 | - | - | - |
| T11 | 5,4 | 2 / 28 / 20 / 8 | 247,1 | 0,75 | 0,52 | - | - | - | - |
| T12 | 5,4 | 3 / 28 / 20 / 8 | 245,6 | 0,78 | 0,75 | 0,50 | - | - | - |
| T0b | 9,0 | - | 197,6 | - | - | - | - | - | - |
| T13 | 9,0 | 1 / 30 / 30 / - | 197,5 | 0,72 | - | - | - | - | - |
| T14 | 9,0 | 2 / 30 / 30 / 30 | 197,2 | 0,71 | 0,72 | - | - | - | - |
| T15 | 9,0 | 3 / 30 / 30 / 30 | 197,2 | 0,71 | 0,70 | 0,73 | - | - | - |
| T16 | 9,0 | 4 / 30 / 30 / 30 | 197,1 | 0,71 | 0,70 | 0,73 | 0,75 | - | - |
| T17 | 9,0 | 5 / 30 / 30 / 30 | 196,7 | 0,71 | 0,70 | 0,73 | 0,75 | 0,76 | - |
| T18 | 9,0 | 6 / 30 / 30 / 30 | 196,7 | 0,71 | 0,70 | 0,73 | 0,75 | 0,75 | 0,81 |
| T19 | 9,0 | 4 / 30 / 30 / 20 | 195,8 | 0,72 | 0,70 | 0,72 | 0,67 | - | - |
| T20 | 9,0 | 4 / 40 / 30 / 30 | 191,2 | 0,70 | 0,71 | 0,72 | 0,75 | - | - |
| T21 | 9,0 | 4 / 40 / 30 / 20 | 172,0 | 0,73 | 0,73 | 0,72 | 0,71 | - | - |
| T22 | 9,0 | 1 / 50 / 30 / - | 194,0 | 0,62 | - | - | - | - | - |
| T23 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 190,8 | 0,61 | 0,70 | - | - | - | - |
| T24 | 9,0 | 3 / 50 / 30 / 30 | 177,8 | 0,61 | 0,68 | 0,72 | - | - | - |
| T25 | 9,0 | 4 / 50 / 30 / 30 | 175,6 | 0,60 | 0,69 | 0,72 | 0,73 | - | - |
| T26 | 9,0 | 4 / 50 / 30 / 25 | 166,5 | 0,62 | 0,71 | 0,73 | 0,75 | - | - |
| T27 | 9,0 | 4 / 50 / 30 / 20 | 149,0 | 0,64 | 0,69 | 0,72 | 0,72 | - | - |
| T28 | 9,0 | 4 / 50 / 30 / 15 | 108,9 | 0,61 | 0,67 | 0,63 | 0,60 | - | - |
| T29 | 9,0 | 4 / 50 / 30 / 10 | 77,4 | 0,55 | 0,70 | 0,65 | 0,57 | - | - |
| T30 | 9,0 | 1 / 200 / 30 / - | 72,0 | 0,60 | - | - | - | - | - |
| T31 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 5 | 157,5 | 0,72 | 0,35 | - | - | - | - |
| T32 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 10 | 160,3 | 0,73 | 0,35 | - | - | - | - |
| T33 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 15 | 166,1 | 0,68 | 0,30 | - | - | - | - |
| T34 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 20 | 183,2 | 0,67 | 0,36 | - | - | - | - |
| T35 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 194,6 | 0,67 | 0,58 | - | - | - | - |
| T36 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 40 | 194,7 | 0,68 | 0,64 | - | - | - | - |
| T37 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 60 | 196,6 | 0,67 | 0,68 | - | - | - | - |
| T38 | 9,0 | 1 / 105 / 30 / - | 154,2 | 0,50 | - | - | - | - | - |

Fortsetzung der Tabelle nächste Seite

| Nr. | Länge [m] | Öffnungsgeometrie | | | Ergebnisse | | |
|-----|--------------|--|-----------------------------|----------------------|-------------------------|---|------|
| | | Anzahl / Länge / Höhe / Abstand [cm] | M/V [m] für jede Öffnung | Exzen- trizität e | Versagens- last [kN] | V _c /V _{tot} für Öffnung Nr. | |
| | | | | | | 1 | 2 |
| T39 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 1,35 / 2,15 | - | 195,7 | 0,72 | 0,69 |
| T40 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 1,85 / 2,45 | - | 195,6 | 0,74 | 0,70 |
| T41 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 2,05 / 2,85 | - | 195,1 | 0,75 | 0,72 |
| T42 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 2,35 / 3,15 | - | 195,0 | 0,76 | 0,76 |
| T43 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 0,85 / 1,65 | -5 cm | 192,8 | 0,29 | 0,40 |
| T44 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 1,35 / 2,15 | -5 cm | 192,6 | 0,39 | 0,42 |
| T45 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 1,85 / 2,45 | -5 cm | 192,1 | 0,39 | 0,42 |
| T46 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 2,05 / 2,85 | -5 cm | 189,9 | 0,31 | 0,41 |
| T47 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 2,35 / 3,15 | -5 cm | 181,5 | 0,22 | 0,40 |
| T48 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 0,85 / 1,65 | +5 cm | 197,6 | 0,85 | 0,90 |
| T49 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 1,35 / 2,15 | +5 cm | 197,2 | 0,91 | 0,92 |
| T50 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 1,85 / 2,45 | +5 cm | 197,4 | 0,92 | 0,92 |
| T51 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 2,05 / 2,85 | +5 cm | 196,8 | 0,92 | 0,93 |
| T52 | 9,0 | 2 / 50 / 30 / 30 | 2,35 / 3,15 | +5 cm | 196,5 | 0,93 | 0,93 |

5.3.3.2 Traglast

Wie bereits in [MATA99] festgestellt wurde, besitzt der Öffnungsabstand maßgeblichen Einfluss auf die Traglast. In Abbildung 5.21 sind die Last-Verformungskurven der Träger T31 bis T37 aufgetragen. Der Träger T0 ohne Öffnung dient hierbei als Referenzträger. Mit steigendem Abstand nähern sich die Last-Verformungskurven der Kurve des Referenzträgers an. D.h. bei Unterschreiten einer Grenzöffnungsgröße verhält sich ein Träger mit Öffnungen annähernd wie ein Massivträger. Die Versagenslasten sind für Stahlbetonträger mit einem Öffnungsabstand größer 30 cm ($x_p/h = 0,5$) annähernd gleich, lediglich die Durchbiegung ist aufgrund der geringeren Steifigkeiten bei den Trägern mit Öffnungen größer als beim Referenzträger.

Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse wird zusätzlich der Träger T38 mit einer großen Einzelöffnung modelliert (siehe Abbildung 5.23). Die Öffnungsgröße von 105 cm entspricht der Summe der Öffnungsgrößen und des Öffnungsabstandes des Trägers T31, der einen Öffnungsabstand von nur 5 cm ($x_p/h = 0,08$) besitzt (siehe Abbildung 5.22). Es wird deutlich, dass bei geringem Öffnungsabstand die Last-Verformungskurven dem Verhalten eines Trägers mit einer Einzelöffnung entsprechen. Auch die Versagenslasten sind gleich groß.

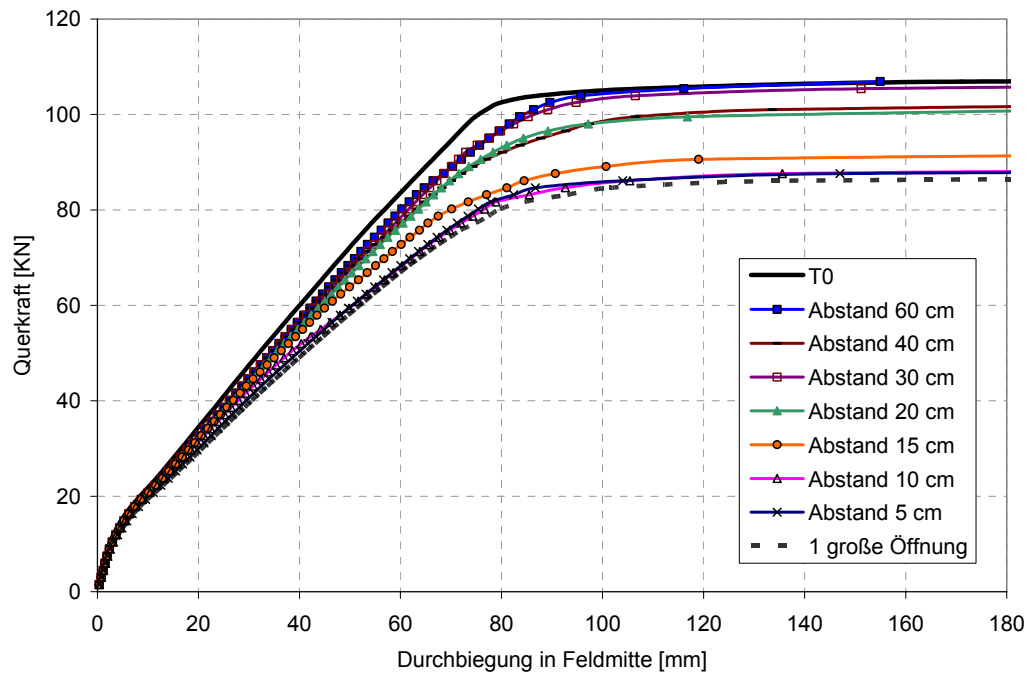


Abbildung 5.21: Last-Verformungskurven in Abhängigkeit des Öffnungsabstandes

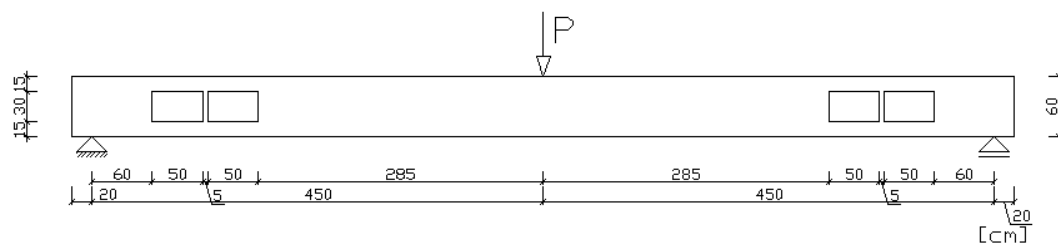


Abbildung 5.22: Geometrie des Trägers T31

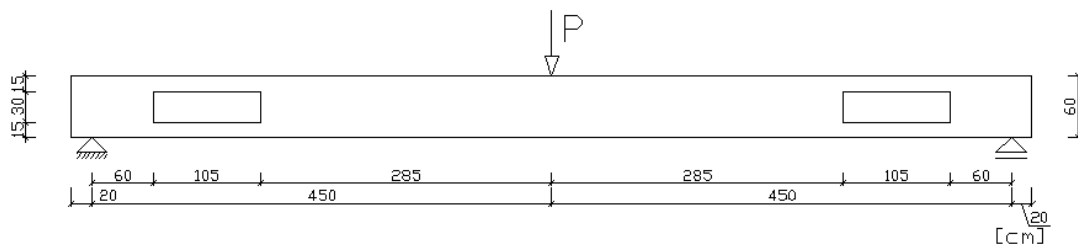


Abbildung 5.23: Geometrie des Trägers T38

In Abbildung 5.24 ist die Traglast im Vergleich zur Traglast eines Massivträgers in Abhängigkeit des Öffnungsabstandes und der Öffnungsanzahl dargestellt.

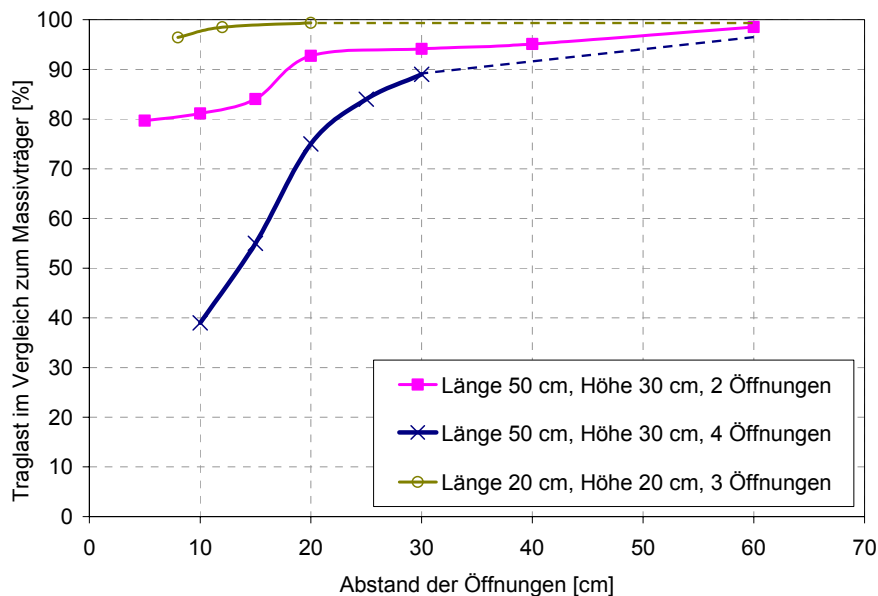


Abbildung 5.24: Traglast in Abhängigkeit des Öffnungsabstands

Die Traglast wird durch einen kleineren Abstand stark vermindert (siehe Abbildung 5.24), da sich keine Druckstreben zwischen den Öffnungen ausbilden können. Deutlich ist die Ausbildung der Druckstreben zwischen zwei Öffnungen in Abbildung 5.25 zu erkennen, während bei einem Öffnungsabstand von 5 cm ($x_p/h = 0,08$) keine Druckstreben entstehen (siehe Abbildung 5.26), so dass das Versagen wesentlich früher eintritt. Für kleine Öffnungen ($h_0/h \leq 0,33$) besitzt der Öffnungsabstand kaum Einfluss auf die Versagenslast, da sich trotz des geringen Abstandes aufgrund der geringen Öffnungshöhe bezogen auf die Trägerhöhe eine Druckstrebe zwischen zwei Öffnungen ausbilden kann (siehe Abbildung 5.27).

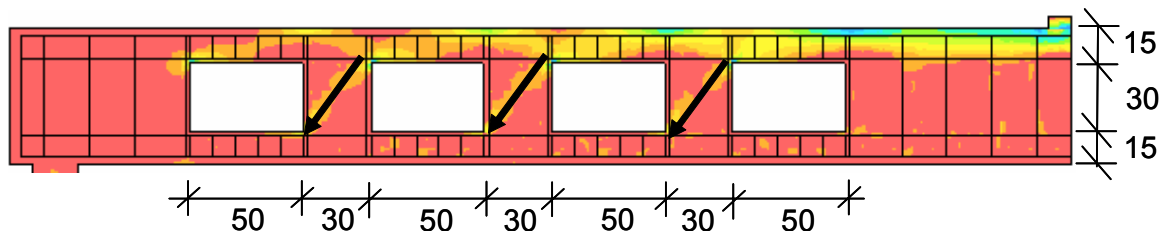


Abbildung 5.25: Hauptdruckspannungen Träger T35

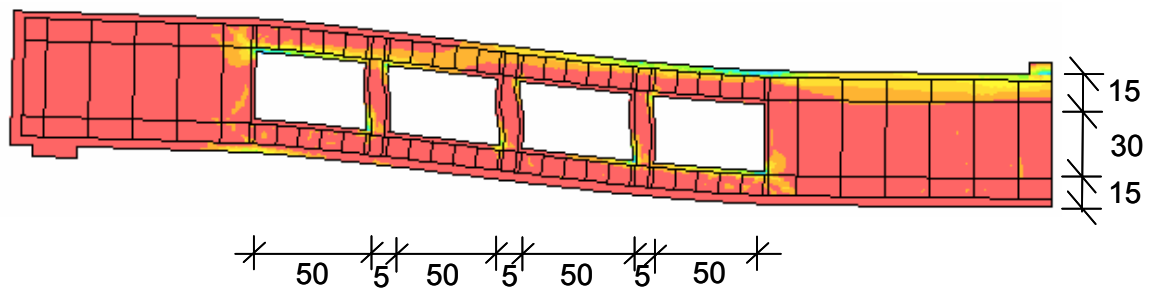


Abbildung 5.26: Hauptdruckspannungen am verformten Träger T31

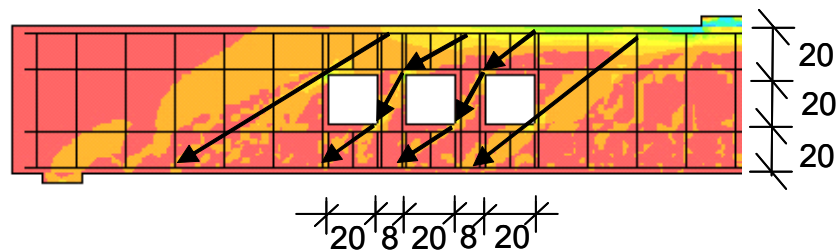


Abbildung 5.27: Hauptdruckspannungen Träger T7

Im Folgenden werden die Auswirkungen weiterer Parameter auf die Versagenslast dargestellt. Die Öffnungsanzahl besitzt auf die Traglast kaum Einfluss. Dieses wird vor allem bei Öffnungen mit kleinen Abmessungen deutlich (siehe Abbildung 5.28). Jedoch vergrößert sich die Durchbiegung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl (vgl. Kapitel 5.8). Zwischen der Länge der Öffnungen und der Traglast bildet sich näherungsweise ein linearer Zusammenhang aus (siehe Abbildung 5.29).

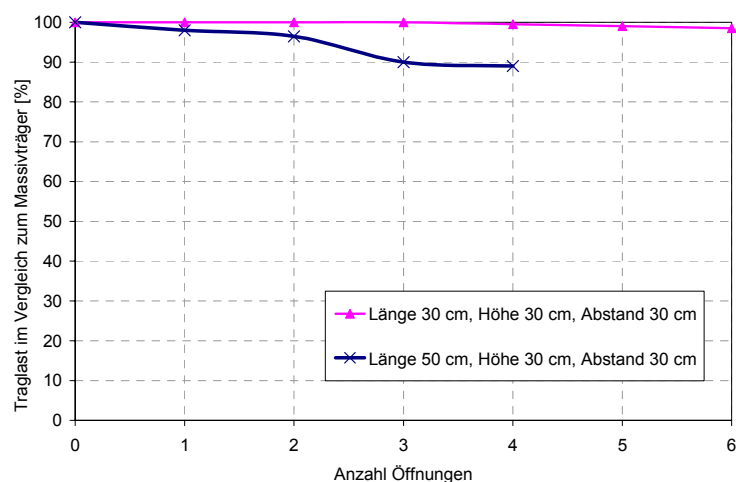


Abbildung 5.28: Traglast in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl

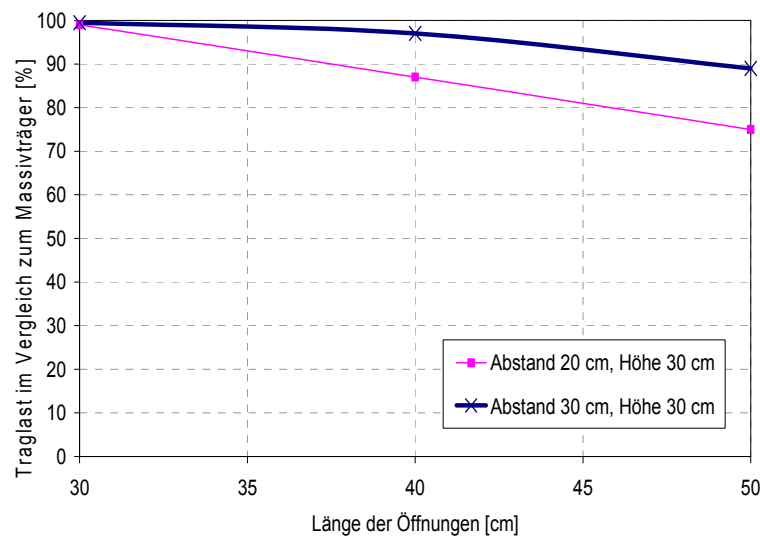


Abbildung 5.29: Traglast in Abhängigkeit der Öffnungslänge

5.3.3.3 Querkraftverteilung

Um den Einfluss der Öffnungslage auf die Querkraftverteilung zu erfassen, wurden Träger mit unterschiedlichen Öffnungsgeometrien (vgl. Abbildung 5.30) bei identischer Öffnungsposition modelliert (Serie MV) und die Ergebnisse miteinander verglichen. In Abbildung 5.31 bis Abbildung 5.34 sind für verschiedene Öffnungspositionen die Querkraftverteilungen aufgetragen. Auffallend ist der ähnliche Verlauf für jedes M/V-Verhältnis bei unterschiedlichen Öffnungsgeometrien. Im Zustand I verteilt sich die Querkraft im Verhältnis der ideellen Gurtsteifigkeiten. Nach der ersten Rissbildung im Zuggurt steigt bei allen Trägern die Querkraft im Druckgurt sprunghaft an. Die Öffnung mit dem kleinsten M/V-Verhältnis erfährt hierbei den kleinsten Anstieg, während die Öffnung mit dem größten M/V-Verhältnis den größten Sprung in der Querkraftverteilung aufweist. Dieses ist auf die Rissbildung im Zuggurt infolge der größeren globalen Biegemomentenbeanspruchung zurück zu führen. Nachdem sich auch im Druckgurt Risse bilden, nimmt die Querkraft im Druckgurt aufgrund des Steifigkeitsverlustes ab. Die Querkraftumlagerung vom Druckgurt auf den Zuggurt ist bei den auflagerfernen Öffnungen stärker im Vergleich zu auflagnahen Öffnungen. Bei der Öffnung mit dem kleinsten M/V-Verhältnis verläuft die Querkraftverteilung nahezu konstant. Insgesamt ist festzustellen, dass bei größeren Öffnungshöhen die Querkraft im Druckgurt ansteigt.

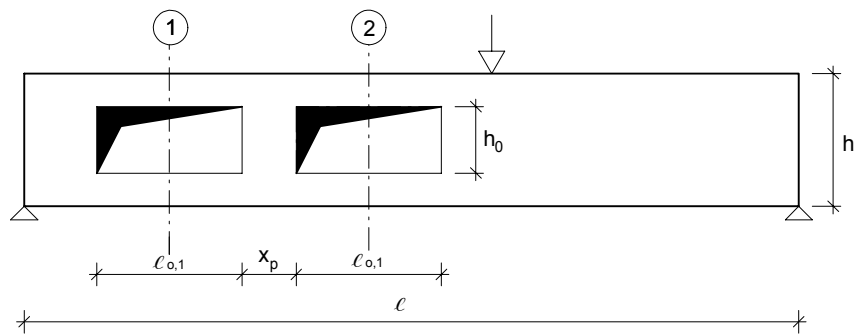
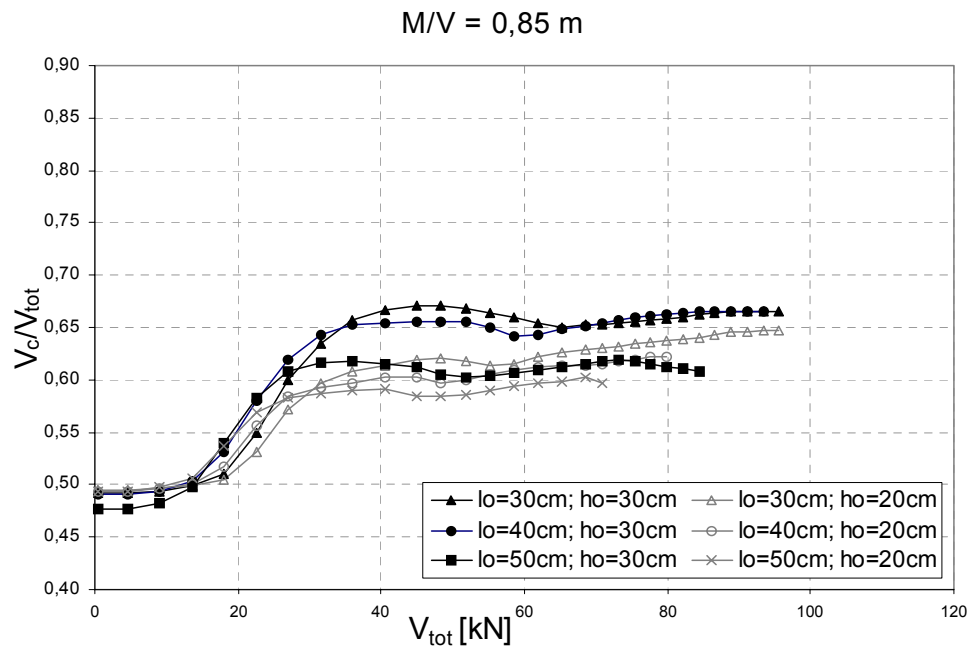


Abbildung 5.30: Bezeichnungen

Abbildung 5.31: Querkraftverteilung für $M/V = 0,85 \text{ m}$ in Abhängigkeit der Öffnungsgröße

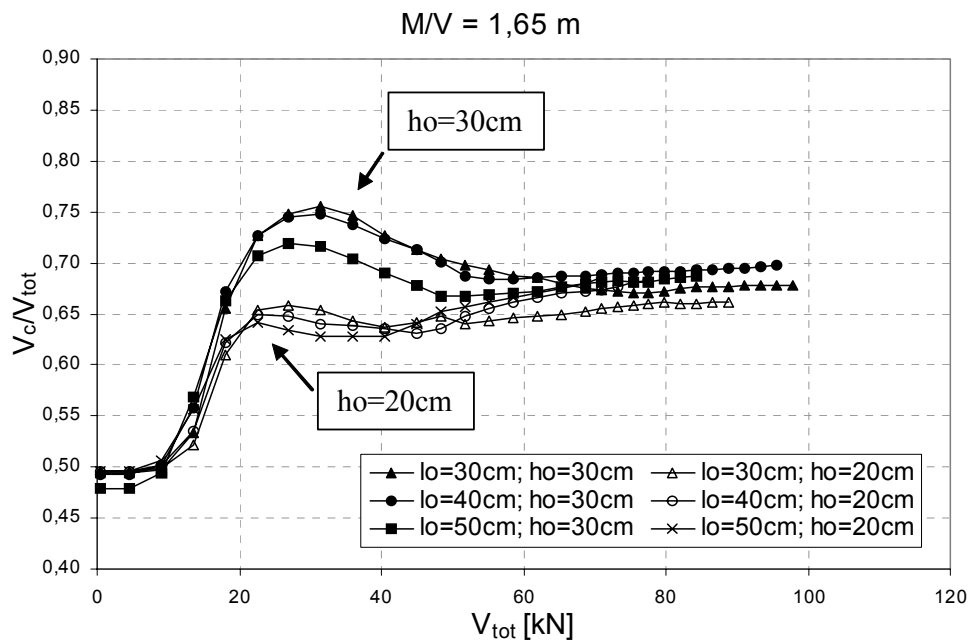


Abbildung 5.32: Querkraftverteilung für $M/V = 1,65 \text{ m}$ in Abhängigkeit der Öffnungsgröße

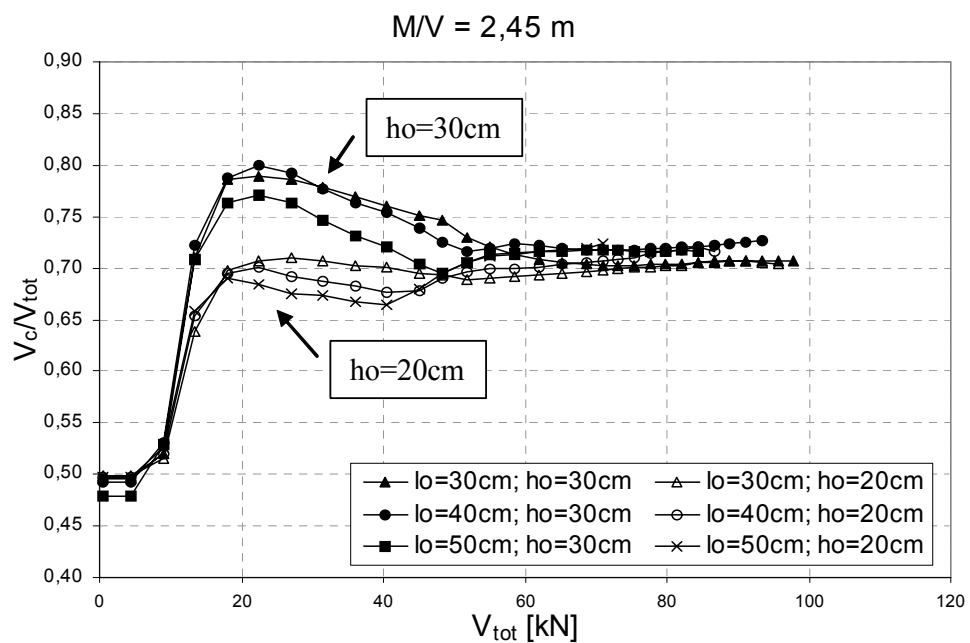


Abbildung 5.33: Querkraftverteilung für $M/V = 2,45 \text{ m}$ in Abhängigkeit der Öffnungsgröße

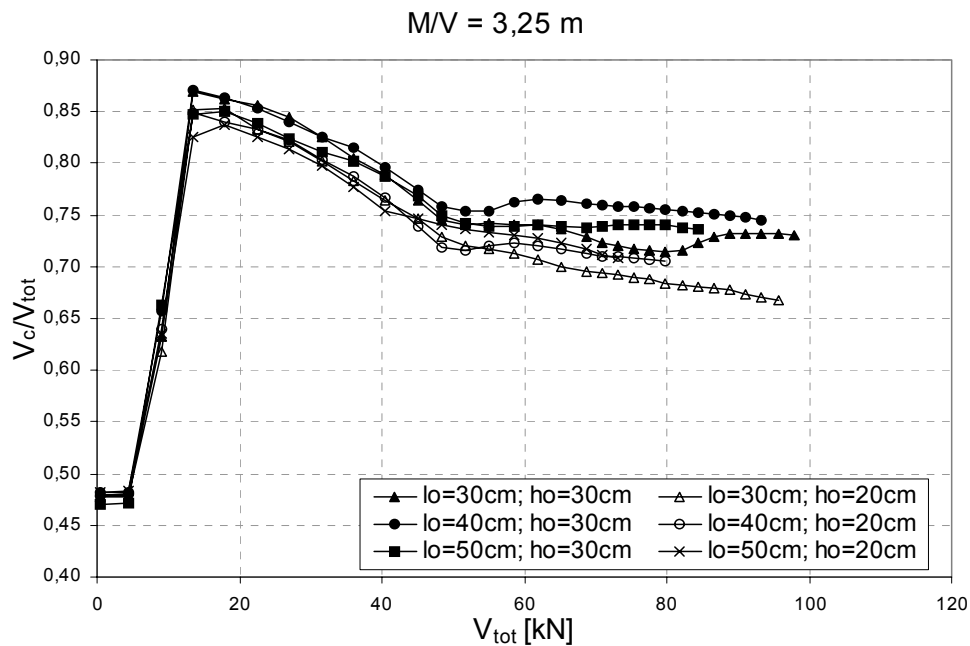


Abbildung 5.34: Querkraftverteilung für $M/V = 3,25 \text{ m}$ in Abhängigkeit der Öffnungsgröße

Die Querkraftverteilung wird weiterhin in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl analysiert. Die untersuchten Stahlbetonträger sind in Abbildung 5.35 dargestellt. In Abbildung 5.36 bis Abbildung 5.41 sind die Querkraftverteilungen für jeweils eine Öffnungslage aufgetragen. Die Verläufe sind identisch mit Ausnahme der zur Last hin nächst platzierten Öffnung innerhalb einer Öffnungsgruppe. Hier ist der Querkraftanteil im Gebrauchszustand um 10% höher im Vergleich zu den Öffnungen im Mittelfeld. Bei Erreichen der Traglast gleicht sich die Querkraftverteilung den übrigen Verteilungen wieder an.

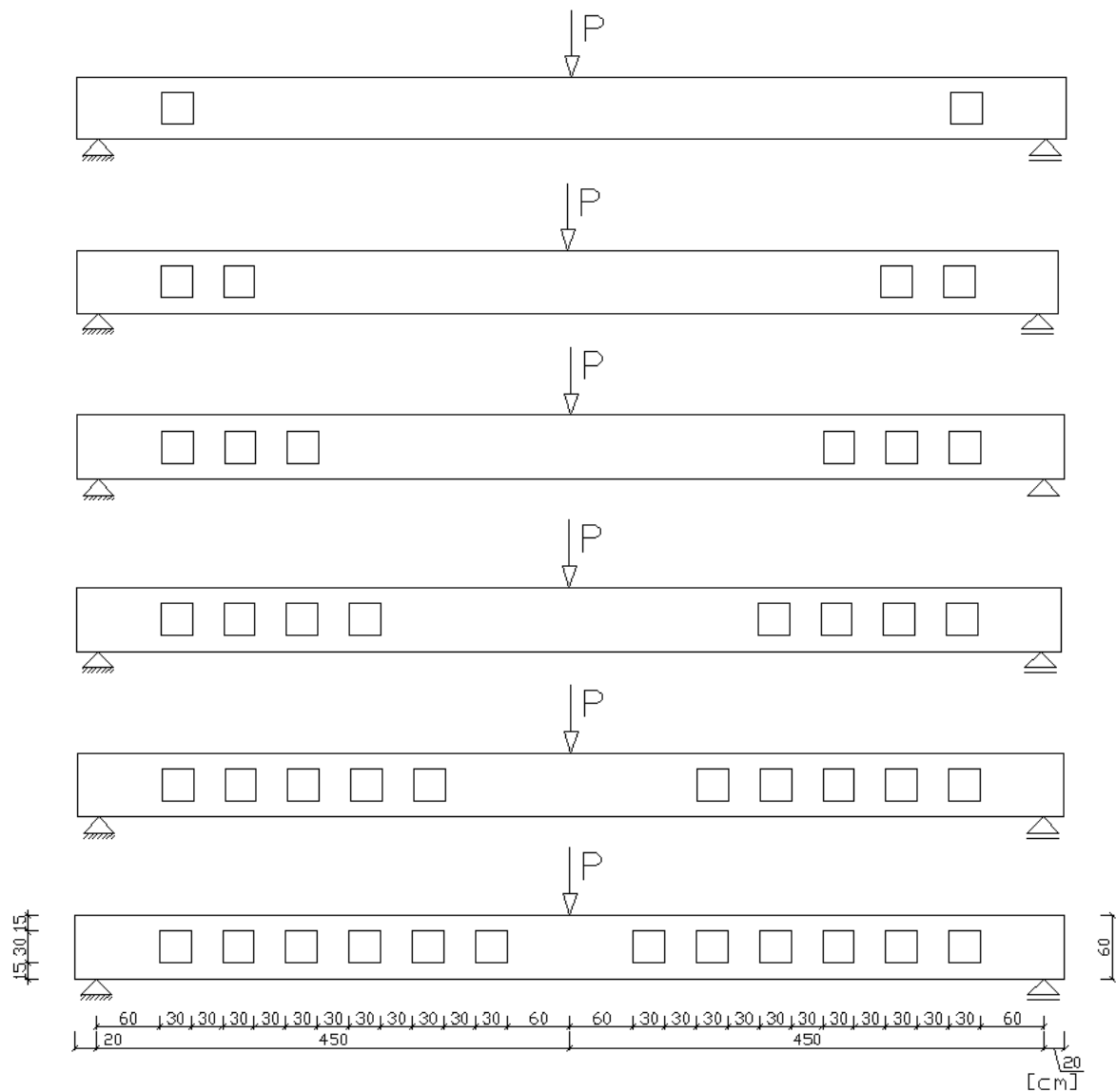


Abbildung 5.35: Statische Systeme für Träger mit unterschiedlicher Öffnungsanzahl

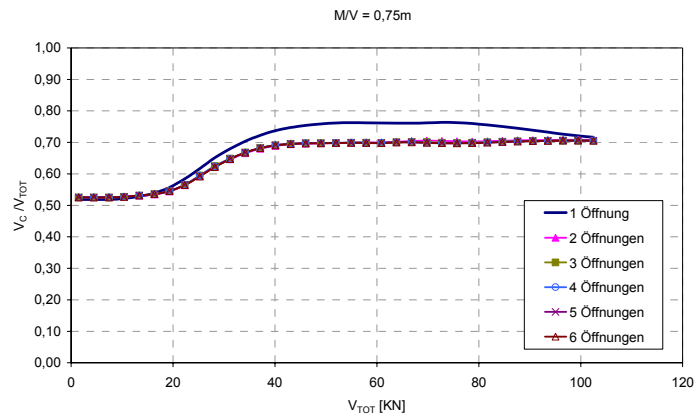


Abbildung 5.36: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl für $M/V=0,75\text{ m}$

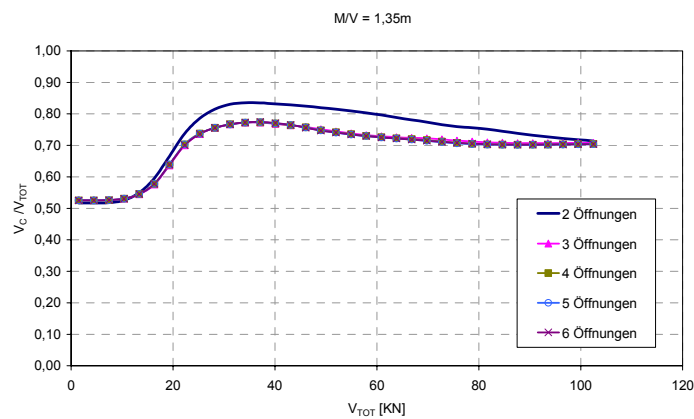


Abbildung 5.37: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl für $M/V=1,35\text{ m}$

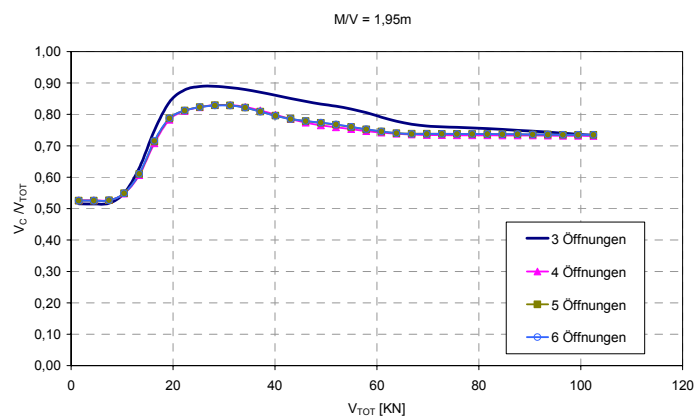


Abbildung 5.38: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl für $M/V=1,95\text{ m}$

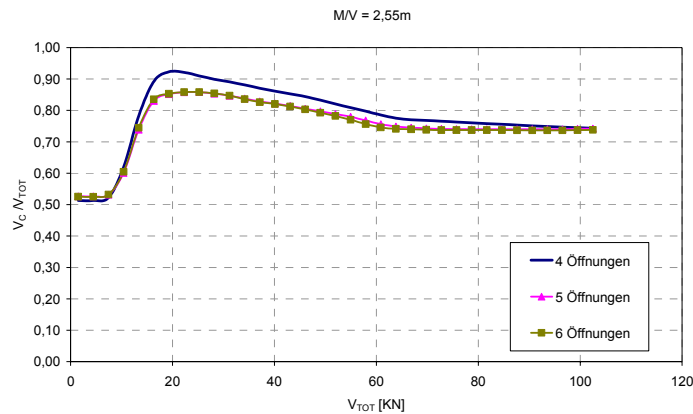


Abbildung 5.39: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl für $M/V=2,55$ m

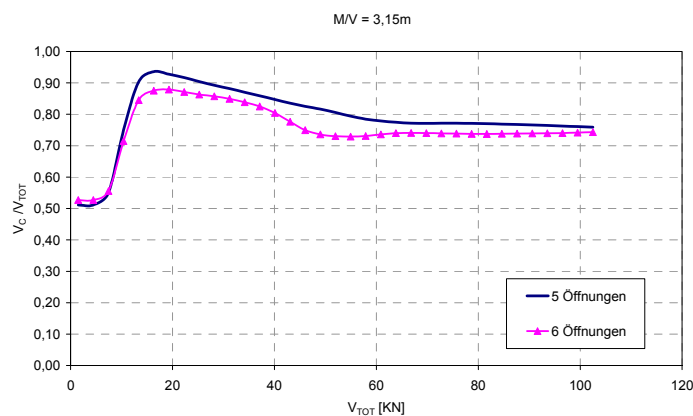


Abbildung 5.40: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl für $M/V=3,15$ m

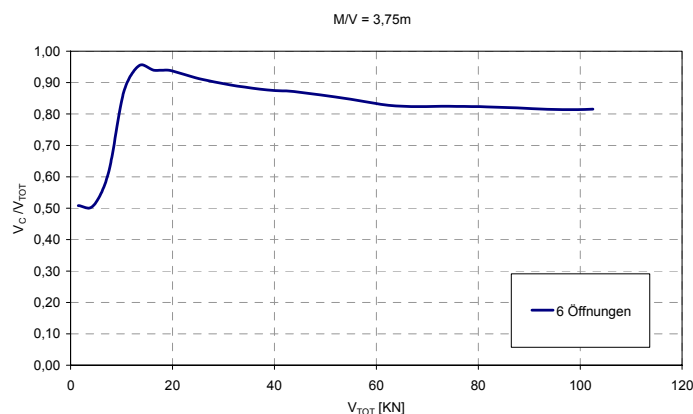


Abbildung 5.41: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl für $M/V=3,75$ m

Weiterhin wird die exzentrische Anordnung der Öffnung in vertikaler Lage untersucht. Hierbei werden die Öffnungen jeweils 5 cm von der Mittellinie nach oben und nach

unten verschoben. Die auf die Öffnungshöhe bezogene Exzentrizität ergibt sich somit zu:

$$\frac{e}{h_0} = 0,083 \quad (5.9)$$

Abbildung 5.42 zeigt die Querkraftverteilung auf die Gurte. Erwartungsgemäß ändert sich die Querkraftverteilung im Zustand I in Abhängigkeit der Gurtsteifigkeiten. Insgesamt sind die Verläufe über die Lastgeschichte affin zueinander. Der Abstand der Kurven bleibt annähernd konstant über die gesamte Lastgeschichte.

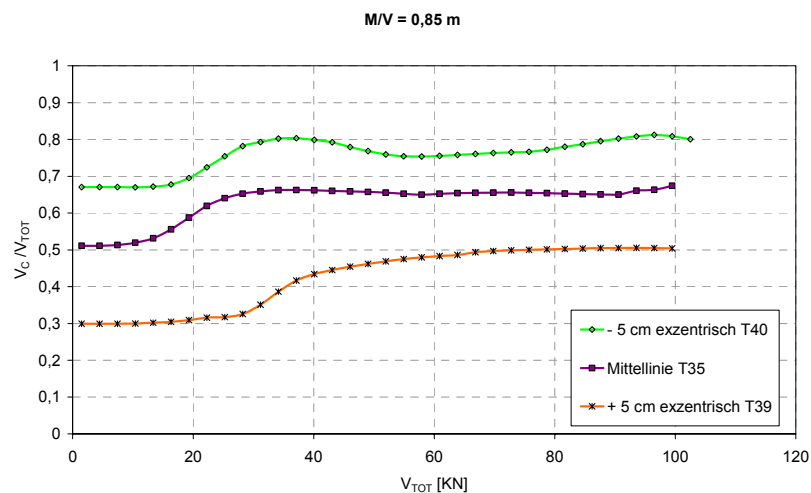


Abbildung 5.42: Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Öffnungslage für $M/V = 0,85$ m

5.3.3.4 Lage des Momentennullpunktes im Steg

Bei Öffnungsgruppen ist die Lage des Momentennullpunktes im Steg zwischen zwei benachbarten Öffnungen entscheidend, um die Beanspruchung des Steges zu erfassen. Daher wurden die Verformungskurven der Stege für verschiedene Laststufen ausgewertet. Analog zur Bestimmung des Momentennullpunktes in den Gurten wird der Wendepunkt der Durchbiegungsfunktion bestimmt. Dieser entspricht dem Nulldurchgang der Momentenlinie im Steg. In Abbildung 5.43 ist die Lage des Momentennullpunktes in den Stegen in Abhängigkeit des M/V -Verhältnisses und der Querkraft aufgetragen. Die Parameter z_p und h_p sind in Abbildung 5.44 erläutert.

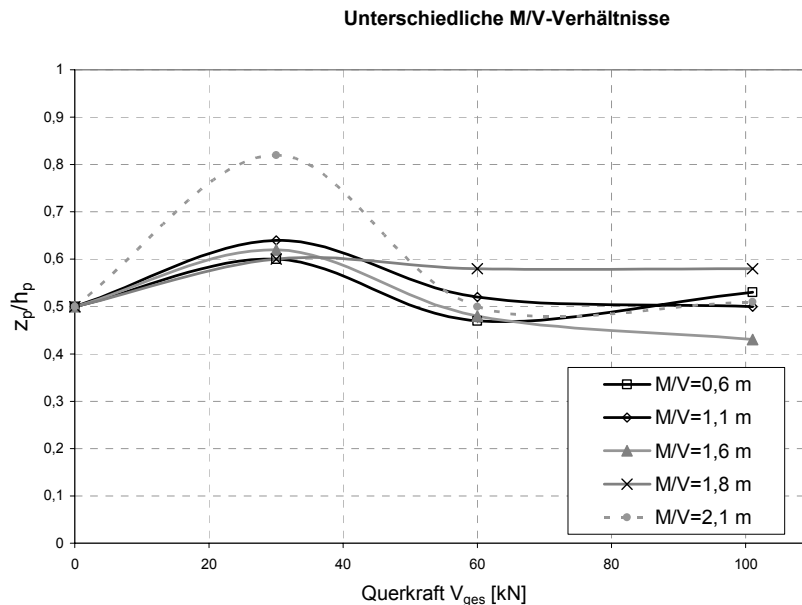


Abbildung 5.43: Lage des Momentennullpunktes im Steg des Trägers T35 für verschiedene M/V-Verhältnisse

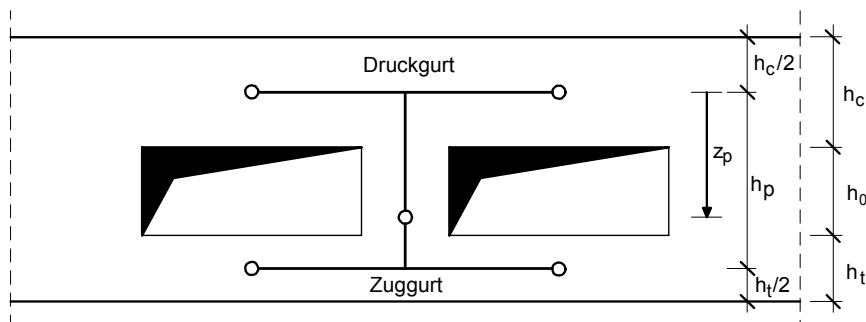


Abbildung 5.44: Lage des Momentennullpunktes im Steg

Bei sämtlichen Trägern ändert sich die Lage des Momentennullpunktes im Steg im Verlauf der Lastgeschichte. Der Verlauf der Lage des Momentennullpunktes in Abhängigkeit der Querkraft ist affin zum Verlauf der Querkraftverteilung. Im Zustand I liegt der Momentennullpunkt in der Mitte des Steges. Bei Einsetzen der Rissbildung im Zuggurt verlagert sich der Momentennullpunkt in Richtung des Zuggurtes. Durch einen längeren Hebelarm vergrößert sich das Biegemoment in der Druckzone. Bei der Bildung von Rissen im Druckgurt verschiebt sich der Momentennullpunkt wieder in Richtung der Stegmitte. Aufgrund der starken Beanspruchung durch das globale Biegemoment ist die Exzentrizität des Momentennulldurchgangs des Trägers mit

$M/V=2,1$ m zum Zeitpunkt der Erstrissbildung am größten. Bei Rissbildung im Druckgurt verringert sich die Exzentrizität analog zu den anderen Trägern.

5.3.3.5 Untersuchung des Einflusses der Aufhängebewehrung

Entscheidend für die Versagenslast sind nach Angaben aus der Literatur [HOSC96; EHM02, SAHA79] unter anderem die Lage und die Größe der Aufhängebewehrung. Daher wurde dieser Parameter eingehend untersucht. Die maximalen Kräfte in der Aufhängebewehrung seitlich der Öffnungen sind in Abbildung 5.46 dargestellt. Die Nummerierung ist Abbildung 5.47 zu entnehmen. Maximal werden ca. 75% der Gesamtquerkraft von der Aufhängebewehrung übertragen. Bei sämtlichen Trägern ist zu beachten, dass die Aufhängebewehrung A_{sH1R} (gerade Zahlen in Abbildung 5.47) eine wesentlich höhere Beanspruchung erfährt als die Aufhängebewehrung A_{sH1L} (ungerade Zahlen in Abbildung 5.47). Bei der Aufhängebewehrung A_{sH1R} wird die gesamte Querkraft wirksam, während die Aufhängebewehrung A_{sH1L} nur durch die Querkraft im Untergurt beansprucht wird (siehe Abbildung 5.45).

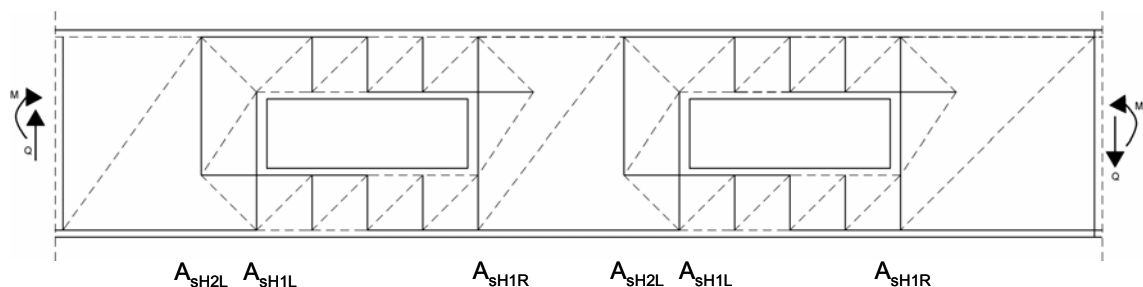


Abbildung 5.45: Fachwerkmodell im Bereich von zwei Öffnungen

Aufgrund der höheren globalen Biegemomentenbeanspruchung steigt die Kraft in den Aufhängebewehrungen mit einem größeren M/V -Verhältnis. Die Aufhängebewehrung mit dem größten M/V -Verhältnis weist eine kleinere Kraft im Vergleich zu den Aufhängebewehrungen der übrigen Öffnungen auf.

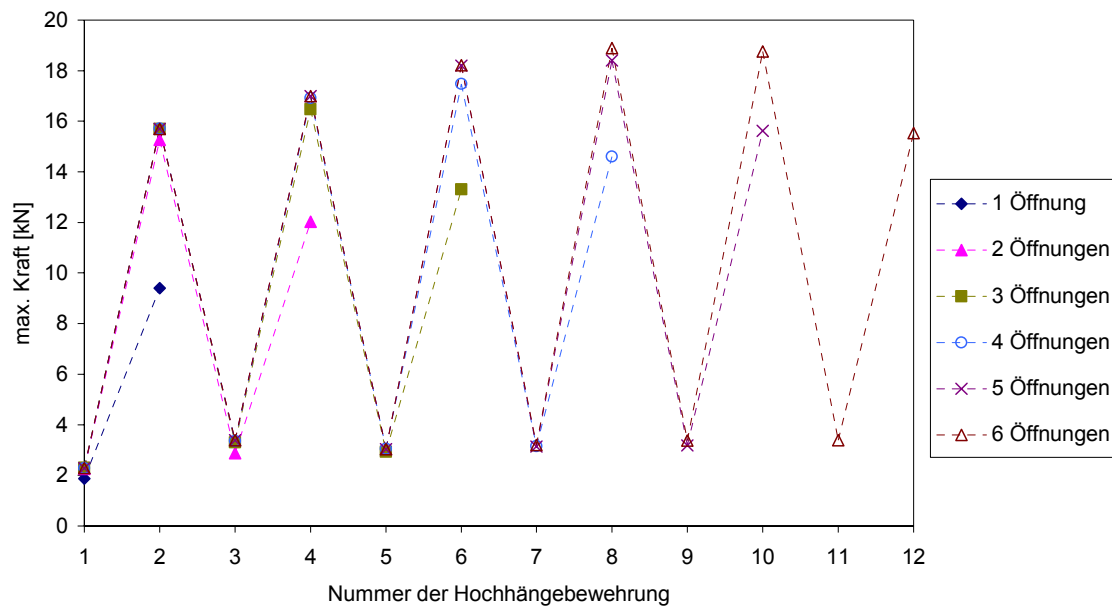


Abbildung 5.46: Maximale Kräfte in der Aufhängebewehrung in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl

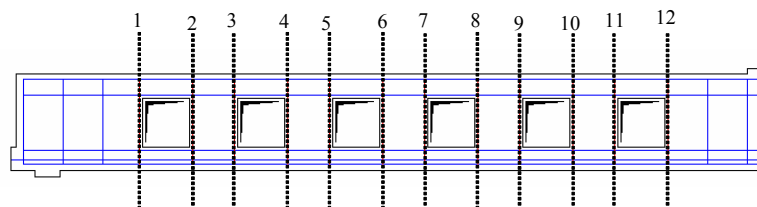


Abbildung 5.47: Nummerierung der Aufhängebewehrung

Die Ergebnisse aus der Parameterstudie zeigen weiterhin, dass es erforderlich ist, die unterschiedliche Beanspruchung der Aufhängebewehrung in Abhängigkeit der Lage im Bemessungskonzept zu berücksichtigen. Eine unterdimensionierte Aufhängebewehrung kann die Traglast eines geschwächten Trägers nachhaltig herabsetzen.

5.4 Spannbetonträger – Voruntersuchungen

5.4.1 Modellierung des Spanngliedes

Zur Modellierung des Spanngliedes in einer FE-Berechnung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, deren Auswirkungen auf die Ergebnisse untersucht wurden (vgl. Kapitel 4.3.6). Parche [PAR98] empfiehlt aufgrund seiner zufriedenstellenden Ergebnisse die einfachste Modellierungsvariante, indem die Wirkung eines Spanngliedes durch äquivalente äußere Kräfte ersetzt wird, d.h. die Anker- und Umlenkkräfte der Spannglieder werden als äußere Lasten angesetzt. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden der diskreten Modellierung des Spanngliedes gegenübergestellt.

Bei der verschmierten Modellierung werden die Spannglieder und die Betonstahlbewehrung in die Betonelemente eingebettet. Hierbei erfolgt die Erzeugung der Spannglieder bzw. Bewehrungsstäbe (bars) durch die Eingabe von mindestens zwei Punkten. In den Elementen, welche an mindestens zwei Kanten von den generierten Stäben durchdrungen werden, überlagern sich die Materialeigenschaften von Beton und Spannstahl bzw. Betonstahl. Die Anker- und Umlenkkräfte der Vorspannung wirken als äußere Kräfte auf den Trägern.

Bei der diskreten Modellierung werden eindimensionale Fachwerkstäbe verwendet, welche das Werkstoffverhalten von Spannstahl bzw. Betonstahl zugewiesen bekommen. Diese Fachwerkstäbe werden nicht direkt an die Betonelemente gekoppelt, d.h. die Fachwerkstäbe und die Betonelemente besitzen unterschiedliche Elementknoten. Daher werden Übergangselemente (interface elements) modelliert, die das Verbundverhalten von Beton und Spannstahl bzw. Betonstahl wirklichkeitsnah wiedergeben können.

Um den Einfluss der Spannstahlmodellierung auf die Ergebnisse ohne weitere Störfaktoren zu bestimmen, wird zunächst ein vorgespannter Träger ohne Öffnung berechnet. In Abbildung 5.48 sind die Last- Verformungskurven für die verschmierte und die diskrete Modellierung des Spannstahls aufgetragen. Für die diskrete Modellierung wird die Verbundbeziehung nach Dörr [DOE74] gewählt. Die Kurven besitzen einen fast identischen Verlauf mit annähernd gleicher Versagenslast. Der Träger mit dem verschmiert modellierten Spannstahl verhält sich aufgrund des starren Verbunds etwas steifer. Des Weiteren stimmen die Ergebnisse in Bezug auf die

Versagensursache und -stelle sowie der Verlauf der Hauptspannungen und der Rissentwicklung überein. Aufgrund der einfacheren Modellierung wird für alle folgenden Berechnungen die verschmierte Spannstahlmodellierung gewählt.

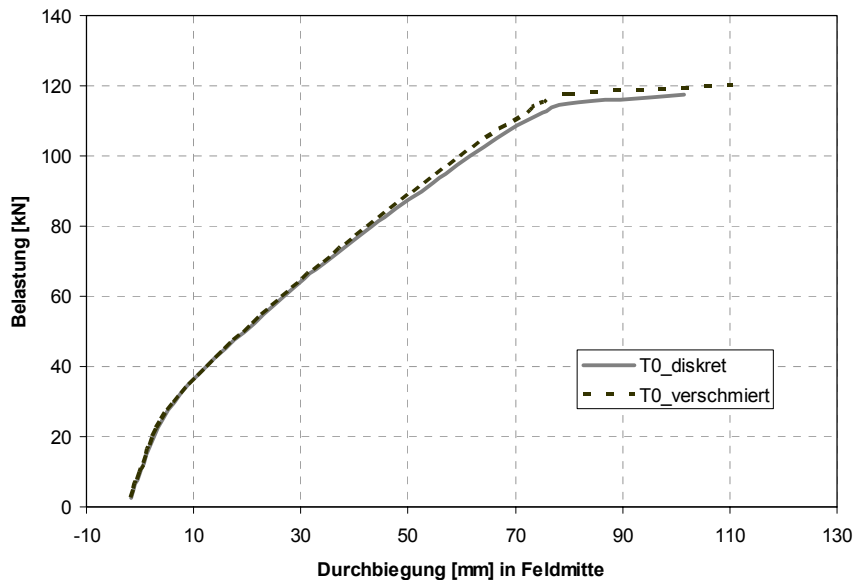


Abbildung 5.48: Last- Verformungskurven für die diskrete und die verschmierte Modellierung des Spannstahls

5.4.2 Versuchsreihe von Warwaruk

Zur Verifikation der Materialmodelle für Spannbetonträger mit Öffnungen werden verschiedene Voruntersuchungen durchgeführt. Aus der Versuchsreihe von Warwaruk [WAR74] werden die beiden am besten dokumentierten Versuche mit dem FE-Programmsystem DIANA modelliert und nachgerechnet. In Abbildung 5.49 ist der Versuchsaufbau für den Träger J2 mit insgesamt acht Öffnungen abgebildet. Der Träger J1 besitzt keine Öffnung und dient somit als Referenzbalken.

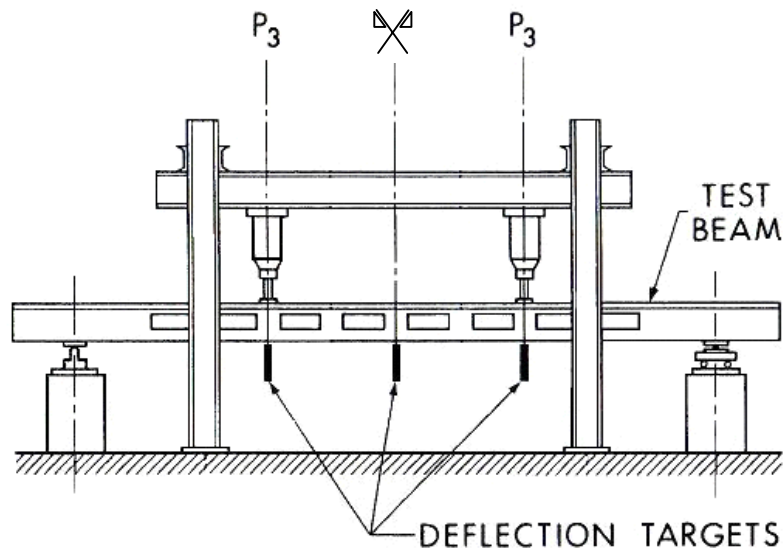


Abbildung 5.49: Versuchsaufbau der J-Serie nach Warwaruk [WAR74]

Zur Modellierung des Plattenbalkenquerschnitts werden sowohl für die Platte als auch für den Steg isoparametrische 8-Knoten Schalenelemente gewählt. Zur Kopplung der obersten Reihe der Stegknoten mit den Mittelknoten der Platte werden folgende Bedingungen vorgegeben:

$$u_{Y,Platte} = u_{Y,Steg} \quad (5.10)$$

$$u_{X,Platte} = u_{X,Steg} + \phi_{Z,Steg} \cdot \frac{d_{Platte}}{2} \quad (5.11)$$

Die Materialkennwerte des in den Versuchen verwendeten Beton- und Spannstahls sind dem ASTM Standards in Building Codes entnommen [ASTM70].

In Abbildung 5.50 sind die Berechnungsergebnisse dargestellt. Sowohl die Versagenslast als auch die Rissentwicklung der eigenen FE-Berechnungen stimmen mit den Versuchsergebnissen überein. Insgesamt verhalten sich jedoch die mit Finiten Elementen modellierten Träger weicher als die Versuchsträger. Die Abweichungen resultieren aus der lückenhaften Angabe der Materialkennwerte in [WAR74], so dass teilweise Annahmen für verschiedene Materialkennwerte getroffen werden mussten.

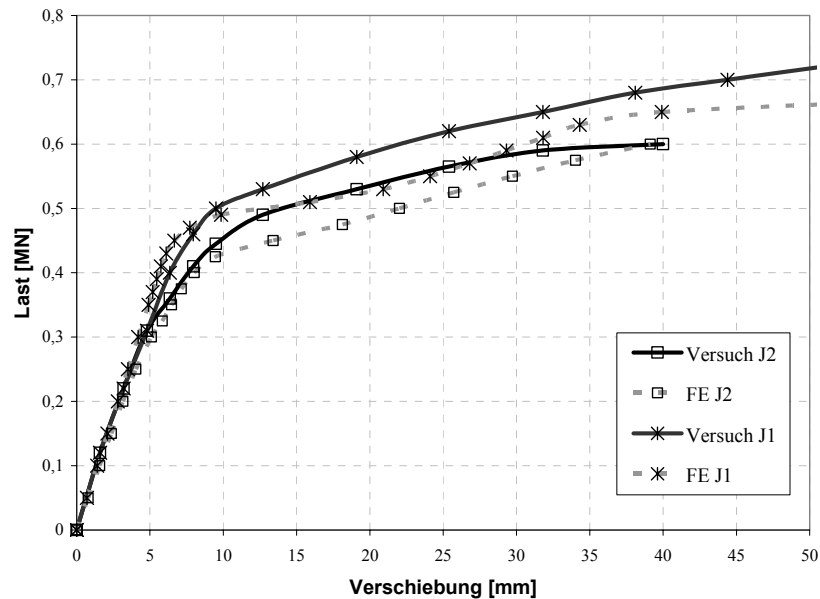


Abbildung 5.50: Last- Verformungskurven – Versuchsergebnisse nach [WAR74] und eigene FE-Berechnungen

5.5 Spannbetonträger mit Einzelöffnungen

5.5.1 Systemeingabe

Um die Unterschiede zwischen Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Öffnungen zu analysieren, wird bei dem bereits untersuchten Versuchsträger E13 (siehe Kapitel 3.3) eine Vorspannung eingefügt. Um eine Erweiterung auf Spannbetonträger mit mehreren Öffnungen zu gewährleisten, wurde das statische System aus der Versuchsserie modifiziert (siehe Abbildung 5.51). Beide Varianten wurden modelliert und miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass beide Systeme die gleiche Beanspruchung erfahren.

In Abbildung 5.51 ist das FE-Netz und die Belastung inklusive der Vorspannkraft dargestellt. Um eine netzabhängige Lösung auszuschließen, wurde das Netz verfeinert. Eine Auswirkung auf die Ergebnisse stellte sich nicht ein, so dass das gewählte Netz in Abbildung 5.51 als hinreichend fein angenommen werden konnte. Die Bewehrungsführung des Betonstahls entspricht dem Versuchsträger E13 (vgl. Abbildung 5.52).

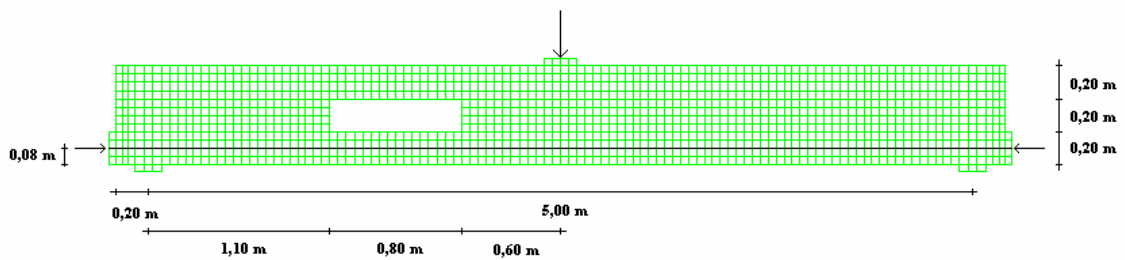


Abbildung 5.51: FE-Netz mit Belastung und Lage des Spannglieds

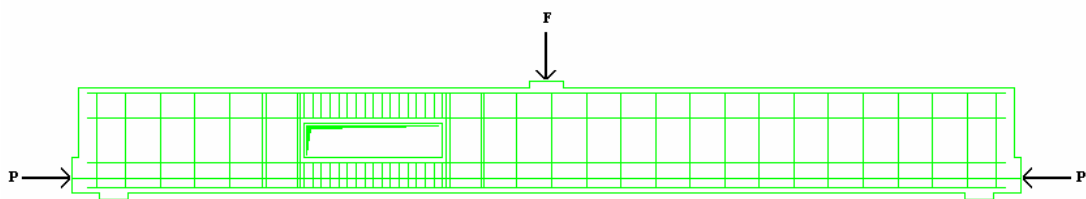


Abbildung 5.52: Bewehrungsführung und Belastung

Um die Auswirkung der Vorspannkraft auf die Ergebnisse zu untersuchen, werden verschieden große Spannkkräfte aufgebracht und mit dem nicht vorgespannten Träger E13 verglichen. Die Abmessungen und die variierten Parameter sind im Anhang B, Tabelle B.3 aufgeführt.

5.5.2 Auswertung der Finite Elemente Berechnungen

Die Bemessung des vorgespannten Trägers SE1 erfolgt nach DIN 1045-1. Um den Einfluss einer Vorspannkraft auf das Trag- und Verformungsverhalten zu analysieren, wird die Vorspannkraft variiert. Die Ergebnisse der Serie SE sind in Tabelle 5.5 zusammengestellt. Sowohl die Versagenslast als auch der Querkraftanteil im Druckgurt kurz vor dem Versagenszeitpunkt sind aufgelistet. Durch die Vorspannung erhöht sich erwartungsgemäß die Versagenslast im Vergleich zu einem Stahlbetonträger. Die einzelnen Einflussfaktoren auf das Tragverhalten von Spannbetonträgern werden im Folgenden analysiert.

Tabelle 5.5: Übersicht der Ergebnisse Serie SE

| Nr. | Öffnungsgeometrie | | | | Vorspannung | vorh. Aufhängebew. | Ergebnisse | |
|-----|-------------------|------------|---------|------|-------------|--------------------|--------------------|---------------|
| | Anzahl | Länge [cm] | M/V [m] | Form | | | Versagenslast [kN] | V_c/V_{tot} |
| SE0 | - | - | - | - | 100% | - | 340,2 | - |
| SE1 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 100% | 100% | 335,0 | 0,70 |
| SE2 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 75% | 100% | 329,1 | 0,69 |
| SE3 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 50% | 100% | 325,3 | 0,69 |
| SE4 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 100% | 150% | 355,0 | 0,75 |
| SE5 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 100% | 50% | 335,0 | 0,69 |
| SE6 | 1 | 80 | 1,0 | □ | 100% | 100% | 334,9 | 0,59 |

In Tabelle 5.6 sind die Querkräfte der Träger mit und ohne Vorspannung für den Zeitpunkt aufgelistet, an dem das erste Fließgelenk entsteht. Die Lage des Fließgelenkes ist bei sämtlichen vorgespannten Trägern identisch. Die maximal aufnehmbare Querkraft bei Erreichen des ersten Fließgelenkes steigt mit zunehmender Vorspannung um bis zu 31%. Die zugehörige Querkraftverteilung und die Entstehung der Fließgelenke sind in Abbildung 5.54 und in Tabelle 5.7 dargestellt.

Tabelle 5.6: Vergleich der Querkraft bei Bildung des ersten Fließgelenkes und der Lage des ersten Fließgelenkes

| Träger | Vorspannkraft bezogen auf Träger E13-100% | Querkraft beim 1. Fließgelenk [kN] | Lage des 1. Fließgelenks |
|--------|---|---------------------------------------|-----------------------------|
| E13 | 0 | 99,0 | T2 |
| SE3 | 50% | 121,6 | T2 |
| SE2 | 75% | 125,2 | T2 |
| SE1 | 100% | 129,3 | T2 |

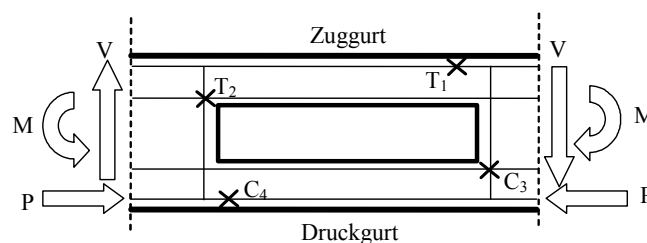


Abbildung 5.53: Lage der Fließgelenkorte

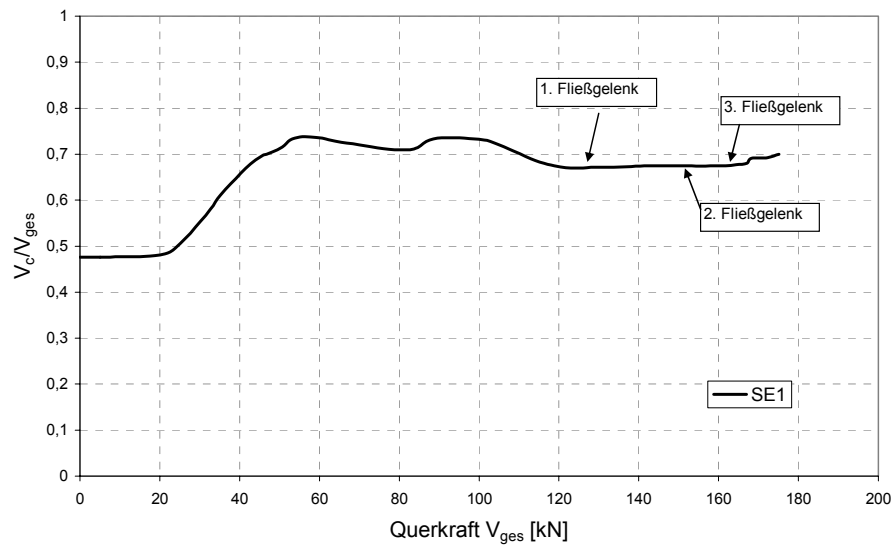


Abbildung 5.54: Querlastverteilung und Entstehung der Fließgelenke des vorgespannten Trägers SE1

Tabelle 5.7: Entstehung der Fließgelenke bei Träger SE1

| Fließgelenk Nr. | Querlast beim Fließgelenk [kN] | Lage des Fließgelenks |
|--------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 1 | 129,3 | T2 |
| 2 | 154,7 | T1 |
| 3 | 167,1 | C3 |

Der prinzipielle Verlauf der Querlastverteilung ist abhängig von der Größe der Vorspannung (siehe Abbildung 5.55). Erwartungsgemäß setzt die Erstrissbildung im Zuggurt bei größerer Vorspannkraft später ein. D.h. der Bereich, in dem sich die Querlast in Abhängigkeit der Steifigkeiten im Zustand I verteilt, vergrößert sich im Vergleich zu dem Stahlbetonträger. Nach der Erstrissbildung lagert sich die Querlast auf den Druckgurt um, da zu diesem Zeitpunkt die Steifigkeit des Druckgurtes höher ist als die des Zuggurtes. Bei Erhöhung der Vorspannkraft ist die Umlagerung der Querlast auf den Druckgurt schwächer ausgeprägt. Auch die Entstehung der Rissbildung im Druckgurt ist abhängig von der Vorspannkraft. Nach Einsetzen der Rissbildung in den Gurten bleibt die Querlastverteilung des vorgespannten Trägers im Vergleich zur Querlastverteilung des Stahlbetonträgers nahezu konstant. Der Anteil der Querlast im Druckgurt liegt zwischen 70 und 80 %.

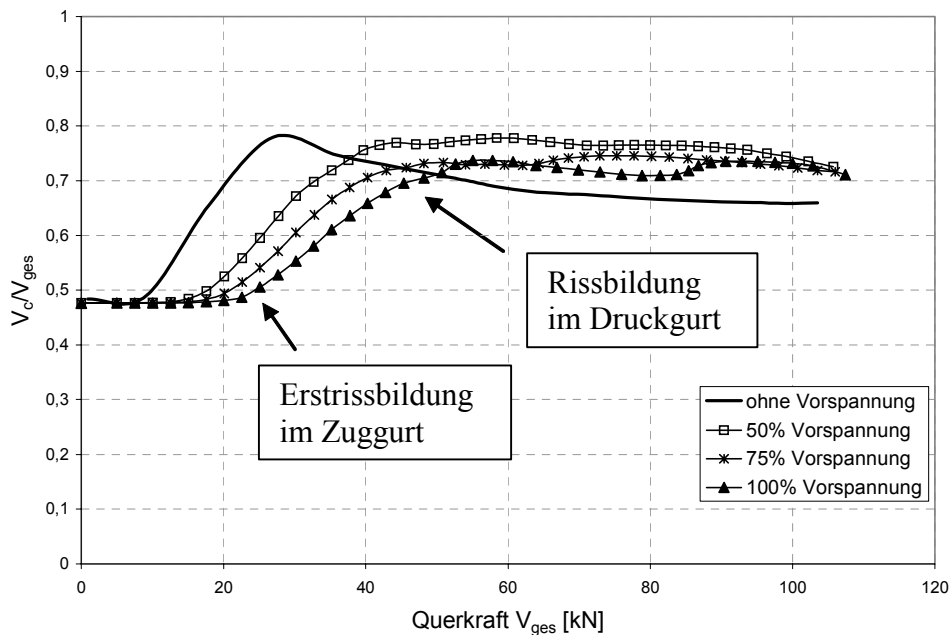


Abbildung 5.55: Querkraftverteilung des Trägers SE1 mit unterschiedlicher Vorspannkraft

Die Kräfteentwicklung in der Aufhängebewehrung für den vorgespannten Träger E13 ist in Abbildung 5.57 dargestellt. Die Bezeichnungen der Aufhängebewehrung sind nochmals in Abbildung 5.56 aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Aufhängebewehrung rechts neben der Öffnung die größte Kraft überträgt. Dieses ist mit der frühen Rissbildung in der rechten unteren Öffnungsecke zu erklären. Insgesamt sind die Kräfte in der Aufhängebewehrung A_{SH1} direkt neben der Öffnung deutlich größer als die Kräfte in der von der Öffnung weiter entfernten Aufhängebewehrung A_{SH2} . In der Aufhängebewehrung A_{SH2} rechts neben der Öffnung ist die Kraft insgesamt am kleinsten, da die Druckstrebe aus der globalen Querkraft überwiegend von der Aufhängebewehrung direkt neben der Öffnung übertragen wird. Dieses Verhalten wurde auch bei Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen beobachtet.

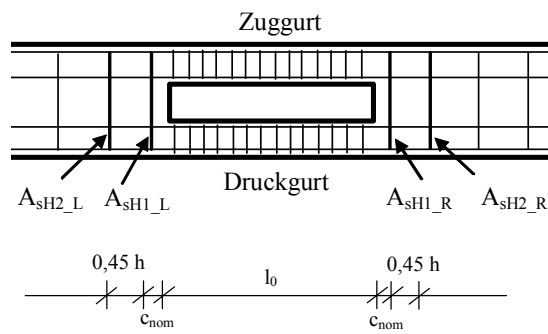


Abbildung 5.56: Beschriftung der Aufhängebewehrung

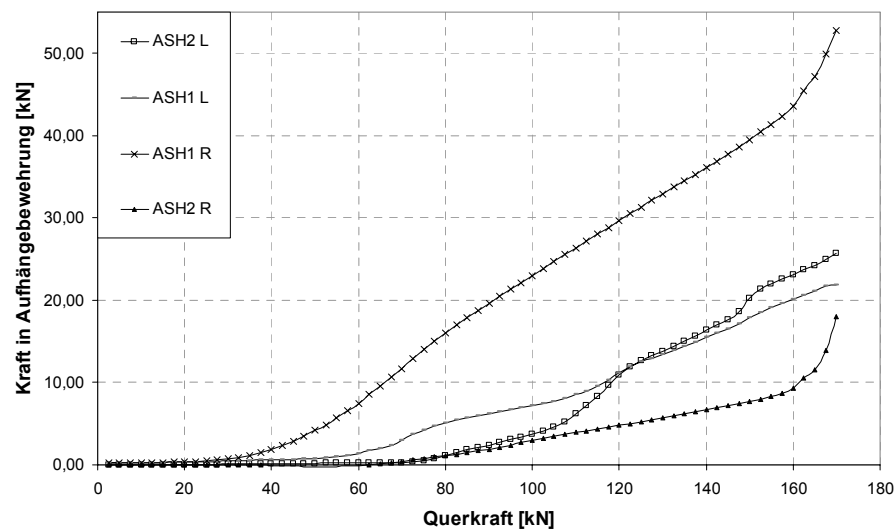


Abbildung 5.57: Kraftentwicklung in Aufhängebewehrung

5.5.3 Vergleich des Tragverhaltens von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die Traglast durch die Vorspannung wie bei Trägern mit Massivquerschnitt erhöht. Zudem verringert sich die Durchbiegung wesentlich. Der Zeitpunkt der Entstehung eines Fließgelenkes wird durch die Vorspannung verzögert, jedoch stimmen der Ort und die Entstehungsreihenfolge der Fließgelenke mit der Fließgelenkentstehung bei Stahlbetonträgern mit Öffnungen überein. Auch der prinzipielle Verlauf der Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Belastung ist bei Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen affin mit einer Ausnahme: Durch die Vorspannung verzögert sich die Erstrissbildung im Zuggurt, so dass sich die Querkraft bei einer höheren Belastungsstufe auf den Druckgurt umlagert im Vergleich zu einem Stahlbetonträger. Somit ist bei einem Ingenieurmodell zur Bestimmung der Querkraftverteilung die Vorspannkraft unbedingt zu berücksichtigen. Bisher existierte jedoch kein durchgängiges und abgesichertes Bemessungskonzept, mit Hilfe dessen die Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Belastung und der Vorspannung bestimmt werden konnte (vgl. Kapitel 2.4).

5.6 Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen

5.6.1 Systemeingabe

Zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen wird eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt (vgl. Anhang B, Tabelle B.4). Die maßgebenden Einflussparameter, welche variiert werden, sind:

- Anzahl, Größe, Abstand sowie Form der Öffnungen
- Vorspanngrad
- Größe der Aufhängebewehrung seitlich der Öffnungen

Die Lage der Bewehrung und der Vorspannung sind in Abbildung 5.58 dargestellt. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wird wiederum die Hälfte des symmetrischen Systems mit Finiten Elementen abgebildet.

Tabelle 5.8: Übersicht der Ergebnisse Serie S

| Nr. | Öffnungsgeometrie | | Ergebnisse | | | | | | |
|-----|-------------------------------|------|-------------------------|--|------|------|------|------|------|
| | Anzahl/Länge/ Abstand [cm] | Form | Versagens- last [kN] | V _c /V _{tot} für Öffnung Nr. | | | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| S0 | - | - | 235,0 | - | - | - | - | - | - |
| S1 | 1/30/30 | □ | 230,0 | 0,62 | - | - | - | - | - |
| S2 | 2/30/30 | □ | 225,1 | 0,58 | 0,58 | - | - | - | - |
| S3 | 3/30/30 | □ | 219,9 | 0,58 | 0,61 | 0,65 | - | - | - |
| S4 | 4/30/30 | □ | 195,3 | 0,45 | 0,45 | 0,80 | 0,70 | - | - |
| S5 | 5/30/30 | □ | 189,8 | 0,45 | 0,39 | 0,77 | 0,69 | 0,68 | - |
| S6 | 6/30/30 | □ | 175,0 | 0,47 | 0,43 | 0,50 | 0,63 | 0,72 | 0,54 |
| S7 | 6/35/30 | □ | 144,9 | 0,40 | 0,51 | 0,61 | 0,70 | 0,63 | 0,51 |
| S8 | 6/35/20 | □ | 135,0 | 0,25 | 0,61 | 0,62 | 0,59 | 0,56 | 0,40 |
| S9 | 6/35/12 | □ | 110,4 | 0,25 | 0,51 | 0,58 | 0,58 | 0,56 | 0,48 |
| S10 | 6/35/8 | □ | 95,0 | 0,28 | 0,54 | 0,60 | 0,49 | 0,48 | 0,48 |
| S11 | 6/25/30 | □ | 225,5 | 0,48 | 0,38 | 0,65 | 0,76 | 0,71 | 0,57 |
| S12 | 6/25/20 | □ | 219,7 | 0,47 | 0,39 | 0,65 | 0,71 | 0,68 | 0,58 |
| S13 | 6/25/12 | □ | 170,3 | 0,47 | 0,58 | 0,62 | 0,55 | 0,46 | 0,42 |
| S14 | 6/25/8 | □ | 164,1 | 0,58 | 0,60 | 0,60 | 0,46 | 0,34 | 0,25 |
| S15 | 6/30/20 | □ | 170,4 | 0,48 | 0,47 | 0,50 | 0,60 | 0,56 | 0,50 |
| S16 | 6/30/12 | □ | 139,7 | 0,61 | 0,61 | 0,62 | 0,52 | 0,39 | 0,41 |
| S17 | 6/30/8 | □ | 134,8 | 0,54 | 0,62 | 0,58 | 0,44 | 0,32 | 0,42 |
| S18 | 6/30/30 | O | 210,0 | 0,49 | 0,49 | 0,68 | 0,81 | 0,86 | 0,58 |
| S19 | 6/30/20 | O | 204,9 | 0,52 | 0,47 | 0,57 | 0,79 | 0,95 | 0,88 |
| S20 | 6/30/12 | O | 200,3 | 0,55 | 0,47 | 0,48 | 0,50 | 0,79 | 0,73 |
| S21 | 6/30/8 | O | 184,8 | 0,71 | 0,55 | 0,59 | 0,52 | 0,38 | 0,38 |
| S22 | 6/30/30 | □ | 174,6 | 0,45 | 0,35 | 0,58 | 0,78 | 0,79 | 0,52 |
| S23 | 6/30/30 | □ | 169,9 | 0,45 | 0,41 | 0,66 | 0,71 | 0,68 | 0,48 |
| S24 | 6/30/30 | □ | 210,3 | 0,56 | 0,49 | 0,81 | 0,73 | 0,80 | 0,68 |
| S25 | 6/30/30 | □ | 200,2 | 0,55 | 0,53 | 0,53 | 0,72 | 0,79 | 0,69 |
| S26 | 6/30/30 | □ | 145,1 | 0,58 | 0,56 | 0,65 | 0,38 | 0,31 | 0,31 |
| S27 | 6/30/30 | □ | 125,0 | 0,55 | 0,57 | 0,60 | 0,45 | 0,34 | 0,42 |

5.6.2.2 Traglast

Innerhalb einer Versuchsserie von Spannbetonbalken mit Öffnungen stellten Kennedy et al. [KEAB92; KEEL82] fest, dass insbesondere die Öffnungsgröße Einfluss auf die Traglast besitzt. Die Öffnungslage beeinflusst die Traglast nicht wesentlich. Dieses konnte innerhalb der eigenen FE-Berechnungen bestätigt werden (siehe Tabelle 5.8).

Anhand der Last- Verformungskurven in Abbildung 5.59 ist weiterhin der Einfluss der Öffnungsanzahl zu erkennen. Erwartungsgemäß verhält sich ein vorgespannter Träger mit zunehmender Öffnungsanzahl aufgrund des Steifigkeitsverlustes weicher. Es stellt sich somit das gleiche Tragverhalten ein wie bei einem Träger ohne Vorspannung.

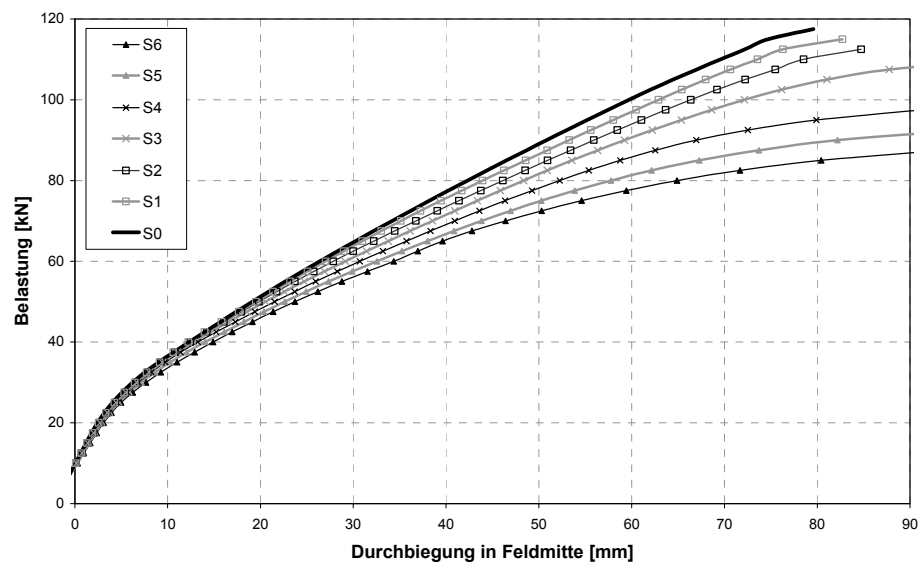


Abbildung 5.59: Last- Verformungsverhalten in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl

Mit zunehmender Öffnungsanzahl versagt der Träger deutlich früher. Die Versagenslast bei einem Spannbetonträger mit sechs Öffnungen erreicht lediglich 75% der Versagenslast des vorgespannten Massivträgers.

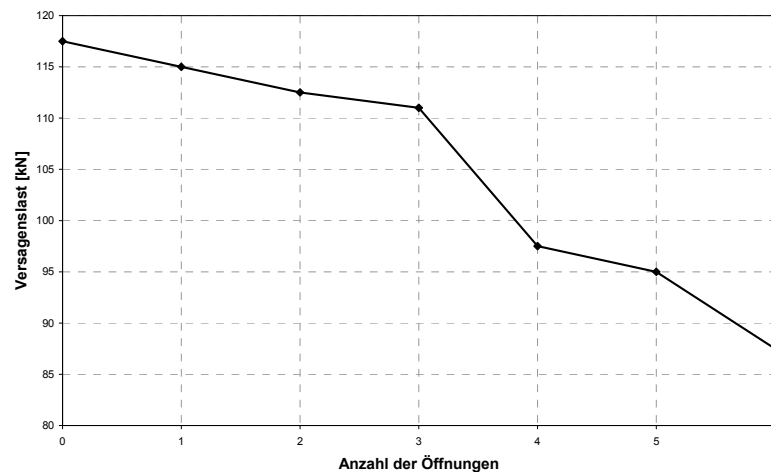


Abbildung 5.60: Versagenslast in Abhängigkeit der Anzahl der Öffnungen

Um den inneren Kräftefluss zu analysieren, sind in Abbildung 5.61 die Hauptdruckspannungen am verformten System im Zustand II aufgetragen. Für einen Öffnungsabstand untereinander von 30 cm ($x_p/h = 0,5$) und 20 cm ($x_p/h = 0,33$) ist deutlich die Ausbildung der Druckstreben zwischen den Öffnungen zu erkennen. Daher sind die Versagenslasten dieser beiden Träger ähnlich groß (vgl. Abbildung 5.62). Bei einem Abstand unter 20 cm ($x_p/h < 0,08$) können sich die Druckstreben zwischen den Öffnungen nicht mehr ausbilden. Die Versagenslasten fallen stark ab.

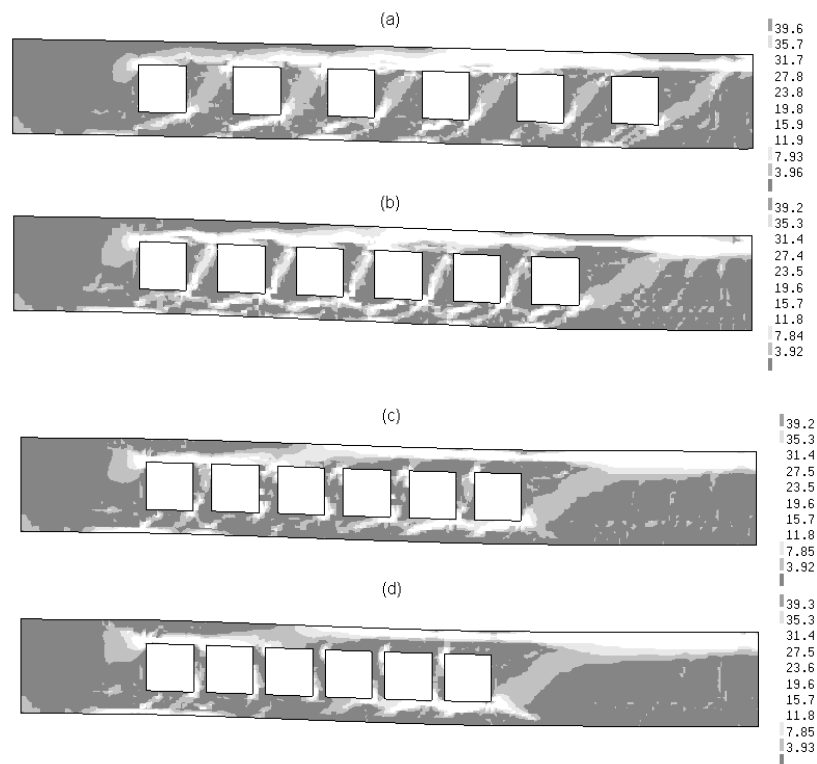


Abbildung 5.61: Hauptdruckspannungen zum Versagenszeitpunkt

- a) Abstand 30 cm
- b) Abstand 20 cm
- c) Abstand 12 cm
- d) Abstand 8 cm

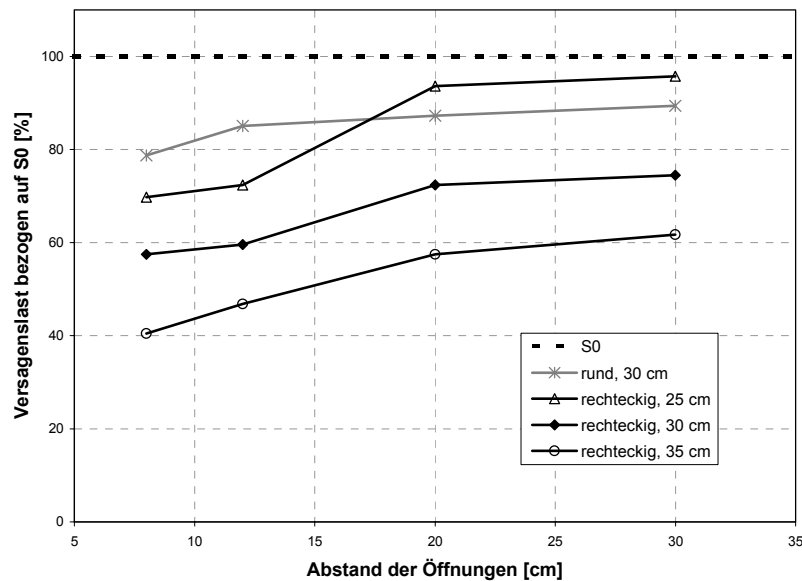


Abbildung 5.62: Versagenslasten in Abhängigkeit des Öffnungsabstands und der Öffnungsgröße

5.6.2.3 Querkraftverteilung

Analog zur Untersuchung des Tragverhaltens von Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen wird im Folgenden die Querkraftverteilung intensiv erforscht. In Abbildung 5.63 bzw. Abbildung 5.64 ist die Querkraftverteilung in Abhängigkeit des Öffnungsabstandes für die Öffnung mit dem kleinsten bzw. mit dem größten M/V-Verhältnis innerhalb einer Öffnungsgruppe dargestellt. Der Verlauf der Querkraftverteilung für die Öffnung mit dem kleinsten M/V-Verhältnis ist für sämtliche Öffnungsabstände identisch, während sich bei der auflagerfernen Öffnung die Querkraft auf die Öffnungsurte in Abhängigkeit der Öffnungsabstände verteilt. Je größer der Öffnungsabstand, umso stärker steigt die Querkraft im Druckgurt nach der Erstrissbildung an. Bei einem Abstand von nur 8 cm ist der Verlauf der Querkraftverteilungen für sämtliche Öffnungen innerhalb einer Gruppe gleich, d.h. die Öffnungsgruppe verhält sich wie eine große Einzelöffnung. Damit ist auch die verhältnismäßig kleine Versagenslast zu erklären, die nur 57% der Versagenslast eines vergleichbaren Spannbetonträgers mit Massivquerschnitt beträgt. Dieses Verhalten konnte auch bei den Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen beobachtet werden.

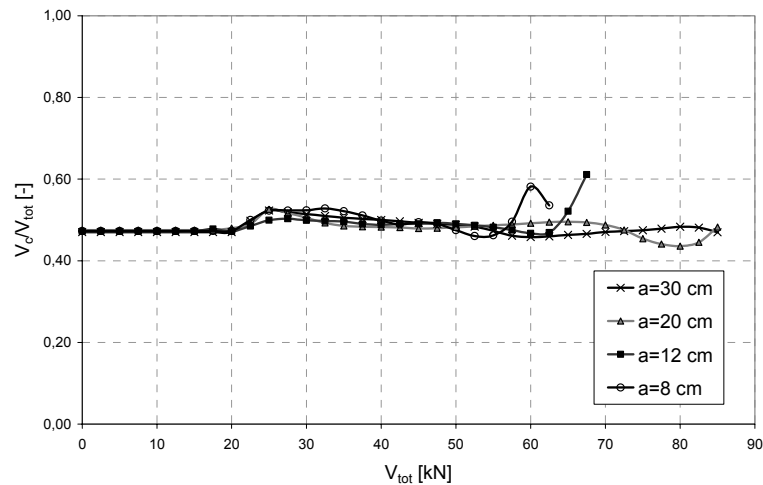


Abbildung 5.63: Querkraftverteilung der auflagnahsten Öffnung, $h_0=30$ cm, in Abhängigkeit des Öffnungsabstandes

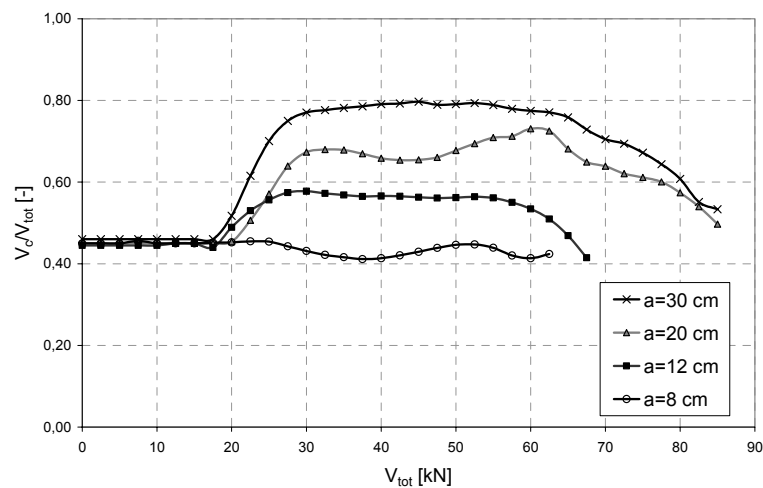


Abbildung 5.64: Querkraftverteilung der auflagerfernsten Öffnung, $h_0=30$ cm, in Abhängigkeit des Öffnungsabstandes

In Abbildung 5.65 sind die Querkraftverteilungen von Spannbetonträgern mit runden und mit quadratischen Öffnungen gegenübergestellt. Die Querkraftverteilungen sind annähernd gleich. Lediglich die Versagenslast ist bei den runden Öffnungen um 20% größer. Dieses resultiert aus der kleineren Querschnittsschwächung bei runden Öffnungen. Zudem entstehen bei den quadratischen Öffnungen in den Öffnungsecken Spannungsspitzen, so dass sich hier vermehrt Risse einstellen.

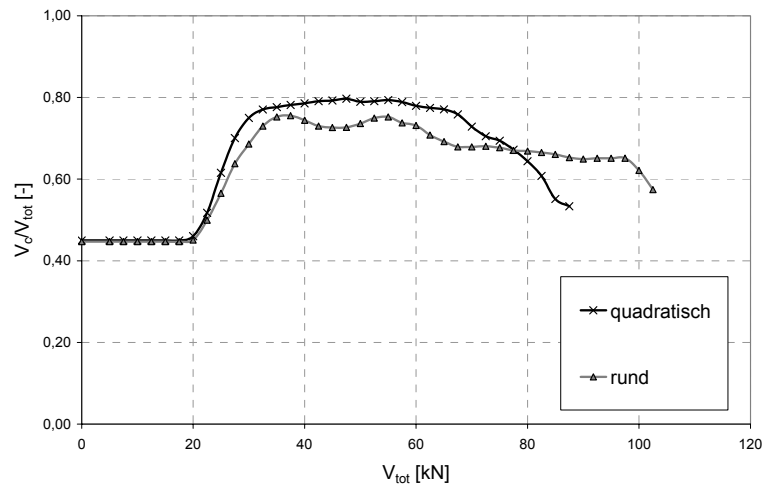


Abbildung 5.65: Querkraftverteilung der auflagerfernsten Öffnung, $h_0=30$ cm, für runde und quadratische Öffnungen

In Abbildung 5.66 ist die Querkraftverteilung für Spannbetonträger mit verschiedenen Öffnungsgrößen dargestellt. Der Zeitpunkt der Erstrissbildung verzögert sich bei den Spannbetonträgern, deren Öffnungen eine geringere Öffnungshöhe aufweisen. Der maximale Querkraftanteil im Druckgurt von 80 % ist nach der Erstrissbildung bei allen Spannbetonträgern annähernd gleich. Auch hier ist die Versagenslast wieder maßgeblich von der Öffnungsgröße abhängig.

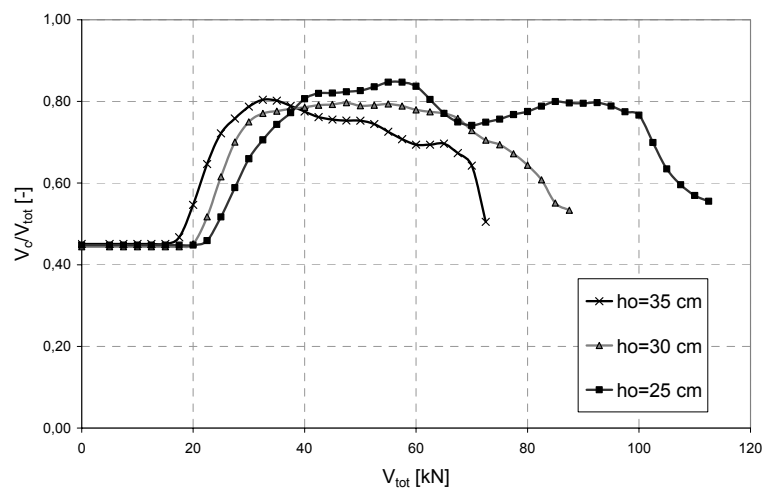


Abbildung 5.66: Querkraftverteilung der auflagerfernsten Öffnung in Abhängigkeit der Öffnungshöhe

5.6.2.4 Aufhängebewehrung

Die Kräfteentwicklung in der Aufhängebewehrung ist in Abbildung 5.67 für Spannbetonträger mit unterschiedlicher Öffnungsanzahl dargestellt. Die Bewehrung rechts neben den Öffnungen ist bei allen Trägern für die linke Trägerhälfte stärker beansprucht. Der Maximalwert ist bei allen Trägern annähernd gleich. Insgesamt lässt sich ein ähnliches Verhalten wie bei Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen feststellen. Auch die Versagenslast und die Querkraftverteilung sind maßgeblich von der Größe und Lage der Aufhängebewehrung abhängig. Daher ist die Anordnung der Aufhängebewehrung sorgfältig zu wählen.

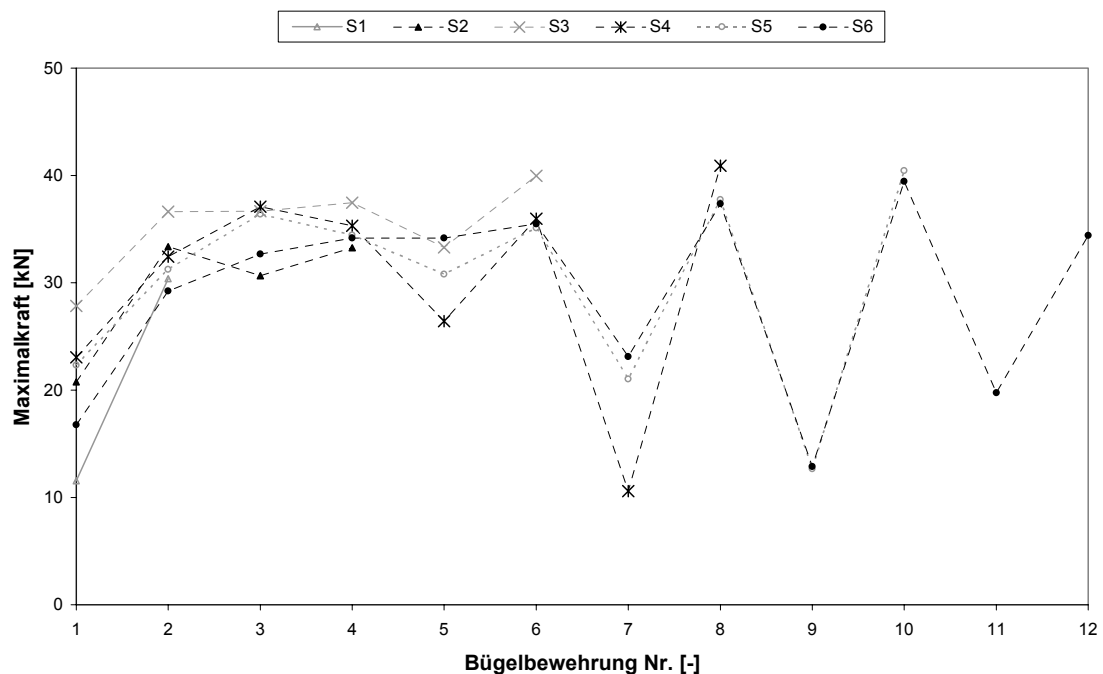


Abbildung 5.67: Kräfte in den Aufhängebügeln seitlich der Öffnungen

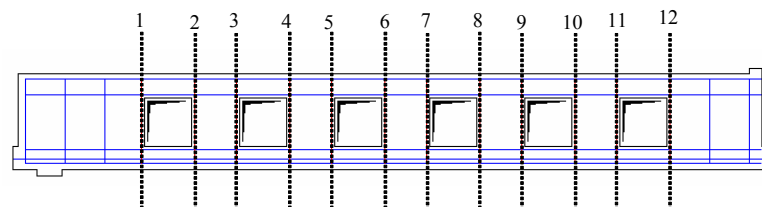


Abbildung 5.68: Nummerierung der Aufhängebewehrung

5.7 Anforderungen an das Ingenieurmodell im Grenzzustand der Tragfähigkeit

In den vorherigen Kapiteln wurden die Untersuchungen des Tragverhaltens von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen im Grenzzustand der Tragfähigkeit dargestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den nichtlinearen Finite Elemente Berechnungen fließen in das entwickelte Ingenieurmodell ein. Auf die Traglast hat vor allem der Öffnungsabstand einen maßgeblichen Einfluss. Entscheidend ist hierbei, ob sich zwischen zwei Öffnungen eine Druckstrebe ausbilden kann. Dieses Verhalten wurde sowohl bei Stahlbetonträgern als auch bei Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen beobachtet. Es ist erforderlich, eine minimale Grenzöffnungslänge zu bestimmen, bei deren Unterschreitung die Öffnungen wie eine große Einzelöffnung zu bemessen ist. Überschreitet der Abstand einen festgelegten Wert, verhält sich der Träger mit einer Öffnungsgruppe wie ein Träger mit mehreren Einzelöffnungen. Die Öffnungen innerhalb einer Öffnungsgruppe sind somit unabhängig voneinander. Die Versagenslast wird weiterhin durch die Öffnungsgröße und Geometrie beeinflusst.

Die Querkraft verteilt sich sowohl bei den Stahlbeton- als auch bei den Spannbetonträgern mit Öffnungen in Abhängigkeit der tatsächlich vorhandenen Steifigkeiten in den Gurten. Wesentlicher Unterschied ist hier die verzögerte Rissentwicklung aufgrund einer Vorspannung. Diese Verzögerung wirkt sich auf die Querkraftverteilung aus. Bei vorgespannten Trägern lagern sich die Querkräfte erst zu einem späteren Zeitpunkt auf den Druckgurt um. Daher ist eine Vorspannkraft im Ingenieurmodell unbedingt zu berücksichtigen.

Auch die Kraftentwicklung in der Aufhängebewehrung ist bei Stahlbeton- und Spannbetonträgern vergleichbar. Bildet sich zwischen zwei Öffnungen eine Druckstrebe aus, muss die Aufhängebewehrung in der Lage sein, diese Kraft aufzunehmen und hochzuhängen. Die Größe und Anordnung der Aufhängebewehrung besitzt sowohl bei den Stahlbetonträgern als auch bei den Spannbetonträgern einen maßgeblichen Einfluss auf die Versagenslast und ist somit sorgsam zu wählen.

5.8 Untersuchung der Durchbiegung

5.8.1 Vorbemerkungen

Zur Untersuchung der Durchbiegung ist eine Betrachtung des globalen Trag- und Verformungsverhaltens von Trägern mit Öffnungen ausreichend. Daher wurde zur Untersuchung der Durchbiegung mit der Finite Elemente Methode eine vereinfachte Modellierung gewählt, so dass der Rechenaufwand minimiert werden konnte. Für die umfangreichen Untersuchungen wurde das Programmsystem Infograph gewählt, welches das nichtlineare Materialverhalten von Beton abbilden kann. Diese neue Modellierung wurde zunächst mit Versuchsergebnissen von Mansur [MATA99] verifiziert. Anschließend erfolgte eine umfangreiche Parameterstudie, welche die Grundlage für das entwickelte Bemessungskonzept zur Berechnung der Durchbiegung bildete.

5.8.2 Modellierung

Für die FE-Berechnungen wurden Träger mit Öffnungen durch Rahmentragwerke mit 2-Punkt-Querschnitt idealisiert (siehe Abbildung 5.69). Hierbei beschreibt Querschnitt Q1 den ungestörten Vollwandquerschnitt, während der biegesteife Öffnungsrand durch den Querschnitt Q2 abgebildet wird. Die Querschnitte Q3 und Q4 stellen den Druck- und Zuggurt dar.

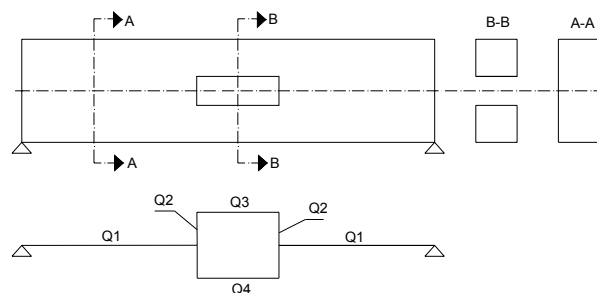


Abbildung 5.69: Idealisierung des 2-Punkt-Querschnitts

Hierbei werden folgende Querschnittswerte angesetzt:

$$Q1: \quad E_1 = E_c \quad (5.12)$$

$$I_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (5.13)$$

$$A_1 = b \cdot h \quad (5.14)$$

$$Q2: \quad E_2 I_2 \rightarrow \infty \quad (5.15)$$

$$E_2 A_2 \rightarrow \infty \quad (5.16)$$

$$Q3: \quad E_3 = E_c \quad (5.17)$$

$$I_3 = \frac{b \cdot h_c^3}{12} + b \cdot h_c \cdot \left(\frac{h_c}{2} + \frac{h_0}{2} \right)^2 \quad (5.18)$$

$$A_3 = b \cdot h_c \quad (5.19)$$

$$Q4: \quad E_4 = E_c \quad (5.20)$$

$$I_4 = \frac{b \cdot h_t^3}{12} + b \cdot h_t \cdot \left(\frac{h_t}{2} + \frac{h_0}{2} \right)^2 \quad (5.21)$$

$$A_4 = b \cdot h_t \quad (5.22)$$

Bei den FE-Berechnungen wurde das nichtlineare Werkstoffverhalten von Beton und Stahlbeton berücksichtigt. Der Druckbereich von Beton wurde über einen parabelförmigen Verlauf nach DIN 1045-1 abgebildet. Im Zugbereich wurde nach Quast [GKQ79] die Mitwirkung der gerissenen Zugzone modelliert.

Die Ergebnisse zeigten erwartungsgemäß, dass sich insgesamt die modellierten Träger im Vergleich zu den Versuchsergebnissen von Mansur zu steif verhielten. Daher wurde die Modellierung modifiziert. Durch umfangreiche Untersuchungen hat Twelmeier [TDF85] Regeln aufgestellt, um die Beanspruchung von Trägern mit Stegaussparungen als ebene Rahmen hinreichend genau zu berechnen. Bei Trägern mit großen Öffnungen ist die Bernoulli-Hypothese nicht mehr gültig. Zwischen dem Randbereich ergibt sich ein Übergang vom 1-Punkt-Querschnitt im ungestörten Balkenbereich zu einem 2-Punkt-Querschnitt, der aus Ober- und Untergurt besteht. Dieser Übergang wird im diskreten Modell durch den Verzweigungspunkt S erfasst (siehe Abbildung 5.70). Die Lage des Verzweigungspunktes ermittelt sich nach Twelmeier [TDF85] wie folgt:

- Es wird eine Störzone neben den Öffnungen modelliert, die sich seitlich von dem oberen und unteren Lochrand (Punkt 1 und Punkt 2) einschnürend unter 45° ausbildet. Dadurch wird der Punkt A_l festgelegt. Der Abstand zwischen diesem Punkt und dem vertikalen Öffnungsrand beträgt:

$$a_l = 0,5 \cdot c_l \quad (5.23)$$

- Der Schnittpunkt der jeweiligen Gurt-Schwereachse mit der unter 45° von Punkt 1 bzw. Punkt 2 ausgehenden Geraden ergibt den Anschlusspunkt A_o bzw. A_u . Somit bestimmen sich die Längen a_o und a_u aus den Abständen zwischen den Schwereachsen der Gurte und den Öffnungsändern. Für den maßgebenden Abstand a_g gilt:

$$a_g = \min(a_o; a_u) \quad (5.24)$$

- Für den Verzweigungspunkt S gilt:

$$S = \max(a_l; a_g) \quad (5.25)$$

Mittels dieser Gleichung und der Schwereachse des ungestörten 1-Punkt-Querschnittes wird die Lage des Verzweigungspunktes S festgelegt. Im nächsten Schritt wird eine Gerade bestimmt, die senkrecht zur Schwereachse des ungestörten 1-Punkt-Querschnittes verläuft. Die Schnittpunkte dieser Geraden mit den Schwereachsen der Gurte werden als A'_o und A'_u bezeichnet.

Das Rahmensystem besteht somit aus den Schwereachsen der einzelnen Abschnitte und der Geraden $\overline{A'_o A'_u}$. Die Steifigkeiten ergeben sich entsprechend den Gleichungen 5.12 bis 5.22.

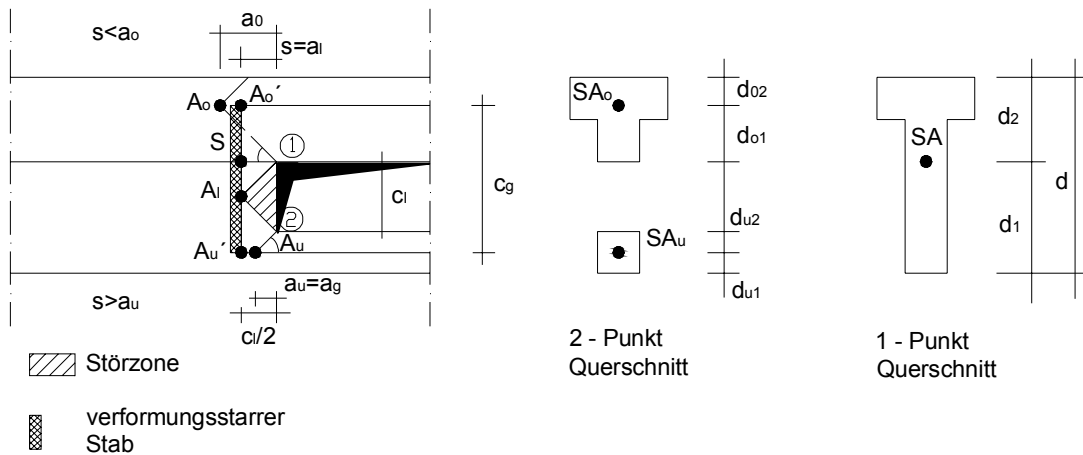


Abbildung 5.70: Ausbildung der Störzone

In Abhängigkeit des Öffnungsabstandes wurden drei verschiedene Fälle entwickelt, um die Störzonen zwischen benachbarten Öffnungen zu simulieren.

Fall 1:

Die gegenseitige Beeinflussung wird zwischen benachbarten Einzelöffnungen ausgeschlossen, wenn folgende Gleichungen erfüllt sind:

$$d_p \geq d_1 + s \quad (5.26)$$

$$d_p \geq d_2 + s \quad (5.27)$$

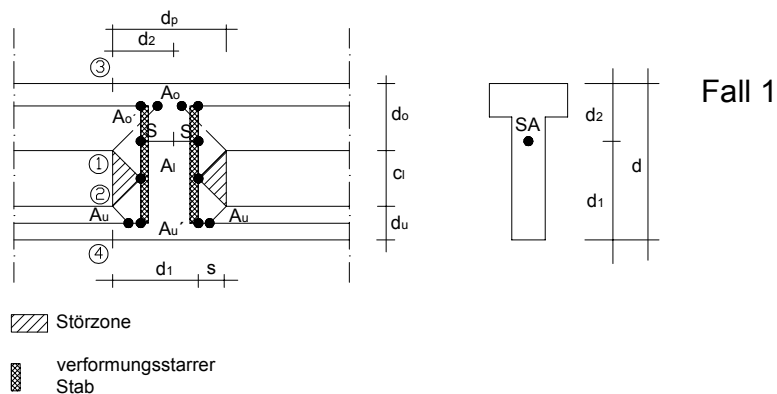


Abbildung 5.71: Modellierung für Fall 1

Fall 2:

Die Beeinflussung zweier Einzelöffnungen beginnt dann, wenn die im Fall 1 gesetzten Bedingungen nicht mehr zu erfüllen sind. Für diesen Fall 2 müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

$$d_p < d_1 + s \quad (5.28)$$

$$d_p < d_2 + s \quad (5.29)$$

$$d_p > 2s \quad (5.30)$$

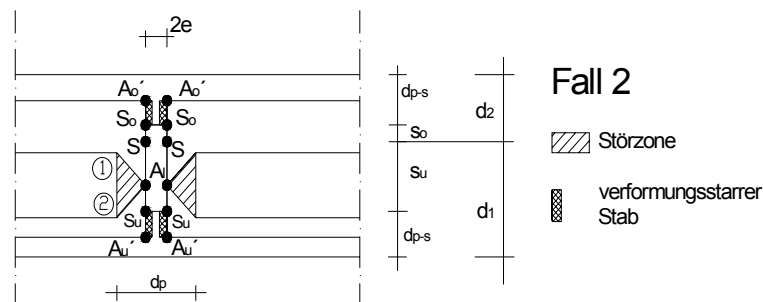


Abbildung 5.72: Modellierung für Fall 2

Fall 3:

Der dritte Fall wird maßgebend, wenn sich der Abstand der beiden Öffnungen soweit verringert, dass folgende Bedingung maßgebend wird:

$$d_p \leq 2s \quad (5.31)$$

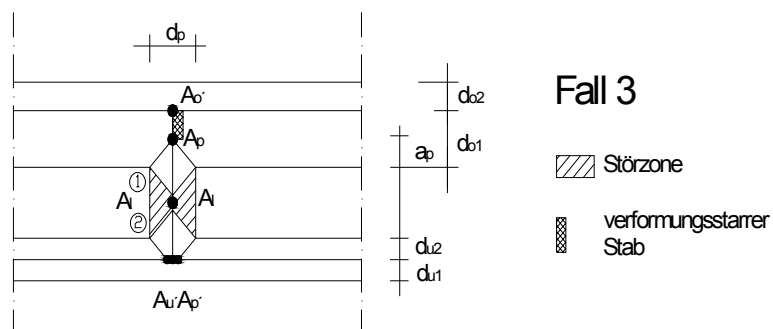


Abbildung 5.73: Modellierung für Fall 3

5.8.3 Verifikation der Versuchsträger von Mansur

Zur Verifikation der Materialmodelle in Infograph wurden Versuchsträger von Mansur [MATA99] modelliert (siehe Tabelle 5.9) und die Ergebnisse mit den Versuchsergebnissen verglichen.

Tabelle 5.9: Abmessungen der Versuchsträger von Mansur

| Bezeichnung | x [cm] | l [cm] | d_t [cm] | d_o [cm] | d_b [cm] | e_o [cm] | $a+l/2$ [cm] |
|-------------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| R1 | 100 | 40 | 11 | 18 | 11 | 0 | 100 |
| R2 | 100 | 60 | 11 | 18 | 11 | 0 | 100 |
| R3 | 100 | 80 | 11 | 18 | 11 | 0 | 100 |
| R6 | 100 | 80 | 13 | 14 | 13 | 0 | 100 |
| R7 | 100 | 80 | 9 | 22 | 9 | 0 | 100 |
| R11 | 100 | 80 | 11 | 18 | 11 | 0 | 100 |

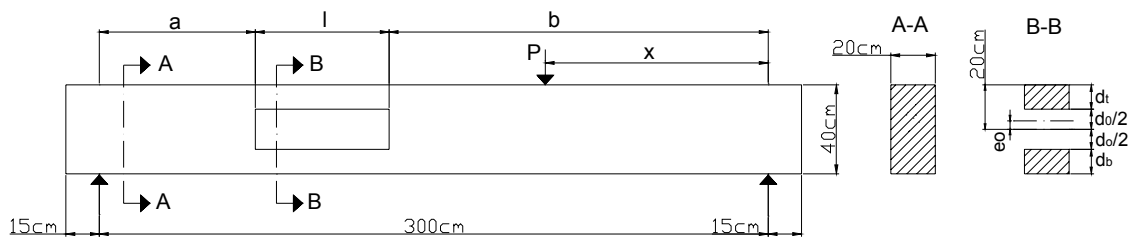


Abbildung 5.74: Statisches System der Versuchsträger von Mansur

In Abbildung 5.75 sind die Versuchsergebnisse von Mansur den eigenen FE-Berechnungen gegenübergestellt. Insgesamt zeigt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Tendenziell verhalten sich jedoch die mit Finiten Elemente modellierten Träger etwas zu steif. Dies ist auf die vereinfachte Modellierung zurückzuführen. Zudem sind die Versuchsergebnisse nicht vollkommen nachvollziehbar, da beispielsweise Träger R3 und R11 nach Angaben des Autors die gleichen geometrischen Randbedingungen besitzen, jedoch die Durchbiegungen im Versuch deutliche Unterschiede aufweisen.

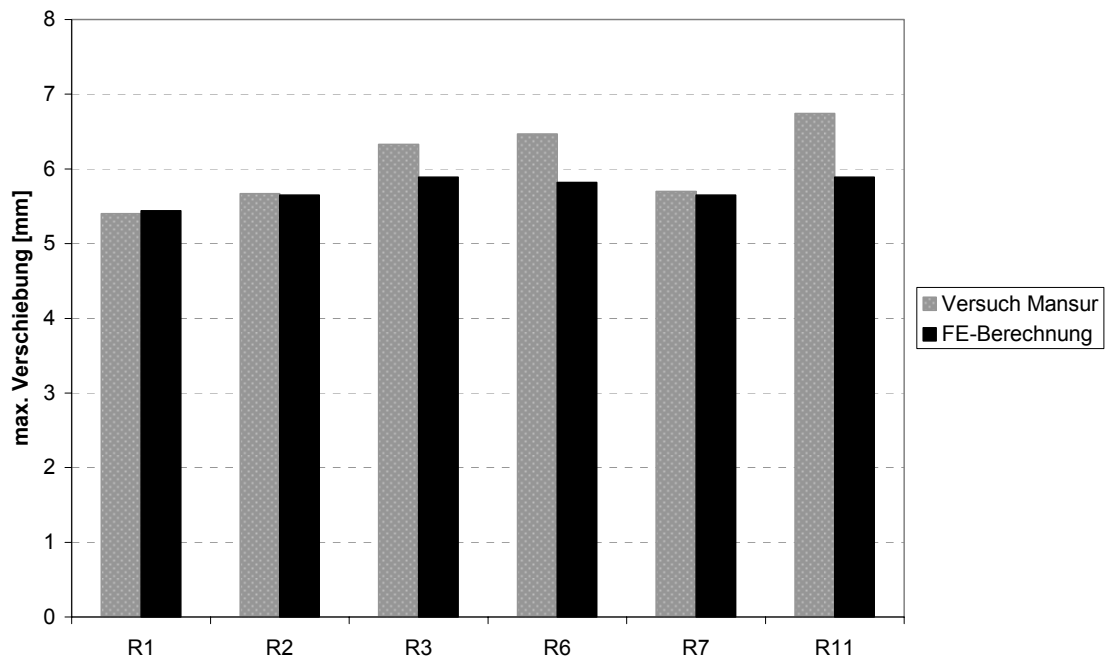


Abbildung 5.75: Vergleich der FE-Berechnung mit den Versuchsergebnissen nach Mansur [MATA99]

5.8.4 Parameterstudie

Innerhalb der Parameterstudie werden die Einflüsse auf die Verformung von Stahlbetonträgern untersucht, indem Lage, Größe, Anzahl und Geometrie der Öffnungen variiert werden. Zusätzlich wird die Veränderung der Bewehrung und deren Folgen auf das Verformungsverhalten untersucht. Im Anhang B sind die untersuchten Träger aufgeführt. Es werden die Bezeichnungen, die Anzahl der Öffnungen pro Trägerhälfte, die Öffnungslänge so wie die durchgeführten Variationen angegeben. In Abbildung 5.76 sind das statische System und die Geometrie des Massivträgers dargestellt. Der Standardträger besitzt eine Öffnungsgröße von 30 cm x 30 cm und die Öffnungen werden in vertikaler Richtung zentrisch angeordnet. Insgesamt werden 112 Träger modelliert und berechnet.

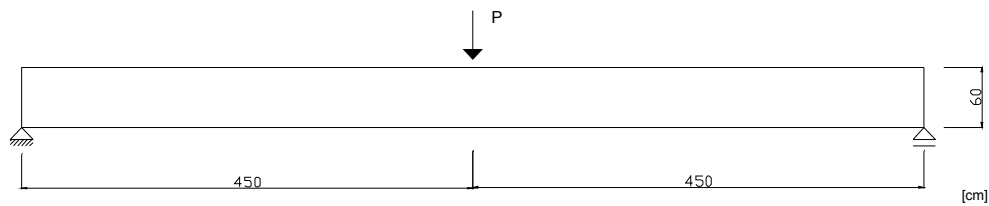


Abbildung 5.76: Statisches System und Geometrie des Massivträgers

Um die Durchbiegungen der einzelnen Träger miteinander vergleichen zu können, wird zunächst für jeden untersuchten Träger die Gebrauchslast wie folgt bestimmt:

$$F_{\text{SLS}} = \frac{F_{\text{ULS}}}{\gamma_{\text{SLS}}} \quad (5.32)$$

Mit

F_{SLS} Gebrauchslast

F_{ULS} Versagenslast

$\gamma_{\text{SLS}} = 1,7$

Globaler Sicherheitsbeiwert zur Bestimmung des Gebrauchslastniveaus

Die Durchbiegung wird auf Gebrauchslastniveau bestimmt, welches aufgrund unterschiedlicher Versagenslasten für jeden Träger variiert. Für die folgenden Diagramme wird daher die Durchbiegung auf die jeweilige Gebrauchslast bezogen, um einen unabhängigen Vergleich untereinander zu gewährleisten.

In Abbildung 5.77 und Abbildung 5.78 sind die auf die Gebrauchslast bezogenen Durchbiegungen im Verhältnis zur Durchbiegung des Massivträgers aufgetragen. Bei Trägern mit einer Gesamthöhe h unter 70 cm und $h_0/h > 0,58$ werden die Gurthöhen zu klein, um diese ausreichend zu bewehren. Daher wird dieser Bereich in den Abbildungen gestrichelt dargestellt. Ein exponentieller Anstieg der Durchbiegung bei steigender Öffnungslänge und Öffnungshöhe ist zu verzeichnen.

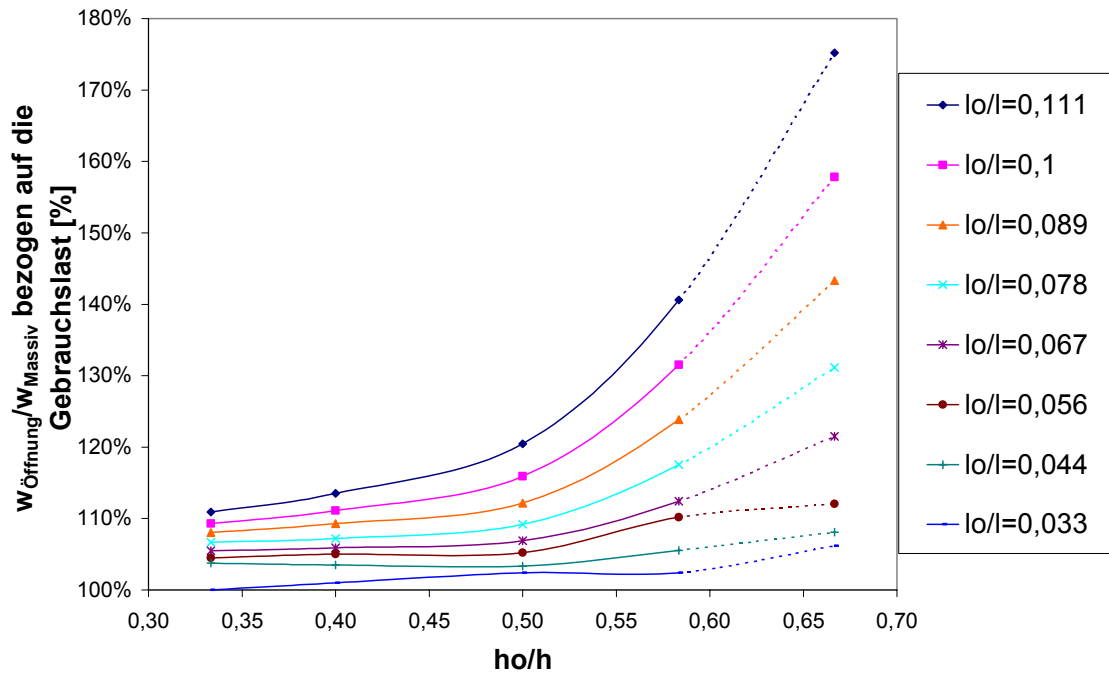


Abbildung 5.77: Durchbiegung der Träger mit Öffnungen bezogen auf die Durchbiegung des Massivträgers in Abhängigkeit der Öffnungshöhe (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)

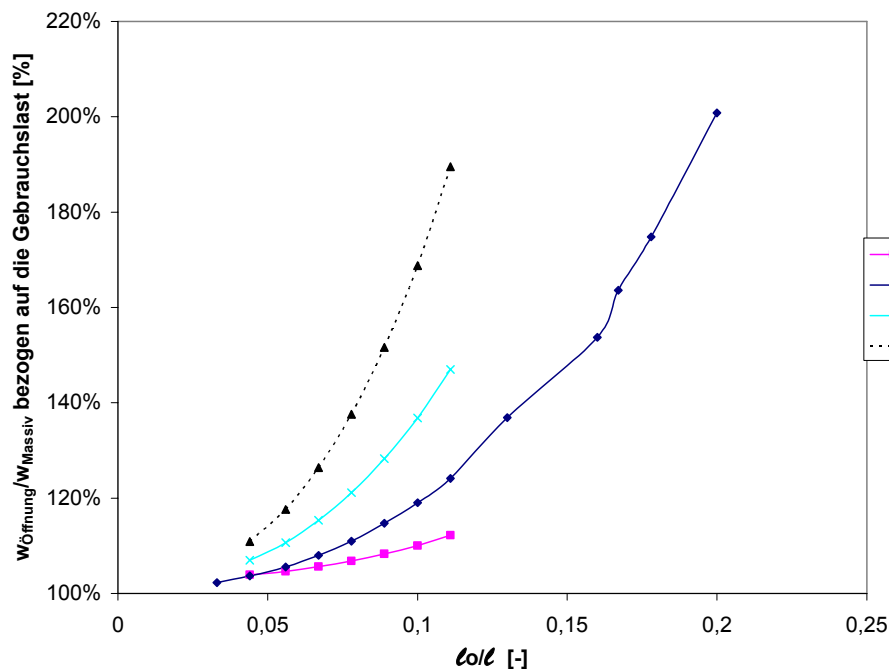


Abbildung 5.78: Durchbiegung der Träger mit Öffnungen bezogen auf die Durchbiegung des Massivträgers in Abhängigkeit der Öffnungslänge (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)

In Abbildung 5.79 wird die Auswirkung der Lage der Öffnungen über das M/V-Verhältnis auf die Durchbiegung untersucht. Hierbei wird auch die Öffnungsanzahl variiert. Durch die Trägerlänge sind die Variationsmöglichkeiten der Öffnungslage bei steigender Öffnungsanzahl begrenzt.

Es stellt sich für sämtliche Träger ein konstanter Verlauf ein. D.h. die Öffnungslage besitzt keinen Einfluss auf die Durchbiegung und kann somit in dem Bemessungskonzept vernachlässigt werden (vgl. Kapitel 6.6.1). In Abbildung 5.79 sowie in Abbildung 5.80 ist weiterhin deutlich zu erkennen, dass sich die Durchbiegung um einen konstanten Faktor in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl erhöht.

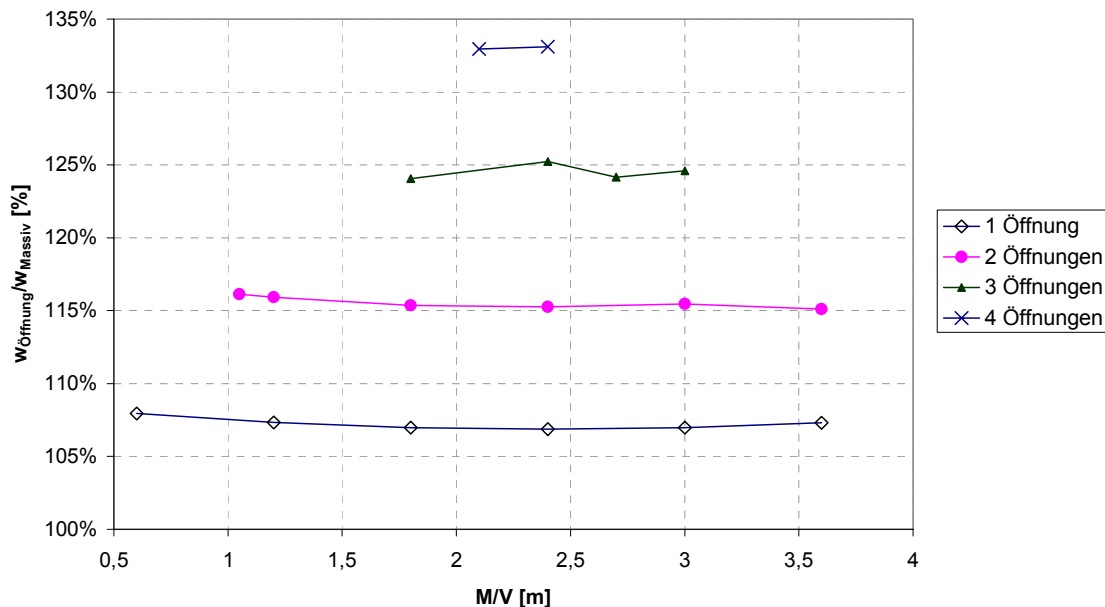


Abbildung 5.79: Durchbiegung der Träger mit Öffnungen bezogen auf die Durchbiegung des Massivträgers in Abhängigkeit der Öffnungslage (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)

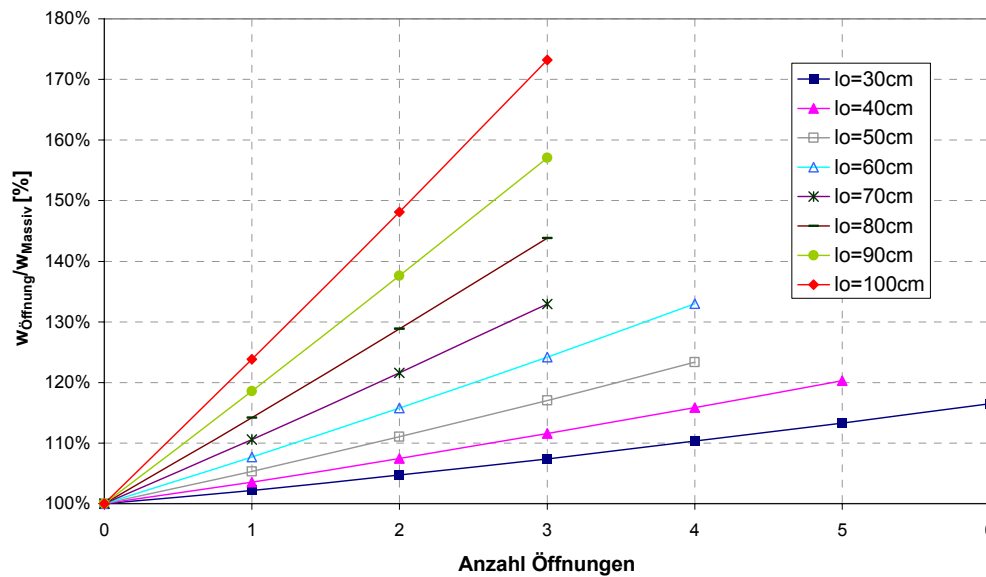


Abbildung 5.80: Durchbiegung der Träger mit Öffnungen bezogen auf die Durchbiegung des Massivträgers in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)

Mit kleiner werdendem Abstand zwischen zwei Öffnungen nimmt die Durchbiegung exponentiell zu (vgl. Abbildung 5.81). Ab einem Abstand von ca. 35 cm ($x_p/h \geq 0,58$) hat der Abstand keinen Einfluss mehr auf die Durchbiegung. D.h. die beiden benachbarten Öffnungen können unabhängig voneinander betrachtet werden.

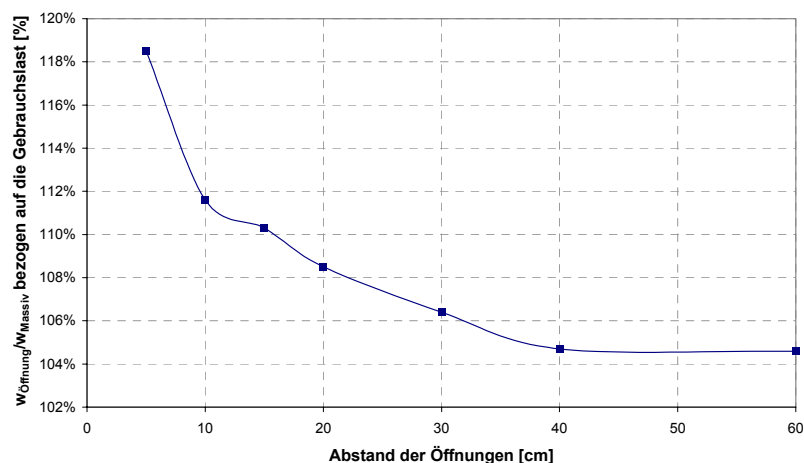


Abbildung 5.81: Durchbiegung der geschwächten Träger bezogen auf die jeweilige Gebrauchslast im Vergleich zum Massivträger in Abhängigkeit des Abstandes zwischen den Öffnungen

Kapitel 6

Entwicklung eines Ingenieurmodells zur Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Öffnungen

6.1 Allgemeines

Die Erkenntnisse aus den experimentellen und den numerischen Untersuchungen dienen als Grundlage für die Entwicklung eines Ingenieurmodells zur Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen. Zunächst wird die prinzipielle Vorgehensweise bei der Bemessung von Trägern mit Öffnungen dargestellt. Für eine abgesicherte und wirtschaftliche Bemessung der Gurte ist eine wirklichkeitsnahe Bestimmung der Querkraftverteilung auf die Gurte erforderlich (siehe Kapitel 6.3). Eine Vorspannkraft ist bei der Bestimmung der Querkraftverteilung zu berücksichtigen. Im Anschluss werden die Besonderheiten bei der Bemessung von Trägern mit Öffnungsgruppen sowie von vorgespannten Trägern mit Öffnungen erläutert.

6.2 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

6.2.1 Vorgehensweise

Aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen wurden die Einflussfaktoren auf das Trag- und Verformungsverhalten ermittelt. Folgende Parameter

beeinflussen das Verhalten eines Stahlbeton- und Spannbetonträgers mit Öffnungen nachhaltig:

- Geometrie der Öffnungen (Öffnungsgröße, -form, -lage in x- und y-Richtung)
- Abstand zwischen den Öffnungen
- Öffnungsanzahl
- Größe und Anordnung der Bewehrung
- Größe der Vorspannung

Diese maßgeblichen Einflussfaktoren wurden somit im entwickelten Bemessungskonzept berücksichtigt.

Um einen Stahlbeton- oder Spannbetonträger mit Öffnungen zu bemessen, ist folgende Vorgehensweise zu empfehlen: Im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist zunächst das Bauteil ohne Öffnungen zu bemessen. Anschließend sind sämtliche Teilbereiche, die innerhalb einer Öffnungsgruppe vorhanden sind, nachzuweisen. Es ergeben sich folgende Teilbereiche:

- Ober- und Untergurt
- Pfosten zwischen zwei benachbarten Öffnungen
- Diskontinuitätsbereich (D-Bereich) zwischen dem Öffnungsrand und dem ungestörten B-Bereich

Zur Bemessung der Gurte ist die Kenntnis über die Schnittgrößenbeanspruchung erforderlich. Hierzu muss zunächst die Querkraftverteilung auf die Gurte geklärt werden (siehe Kapitel 6.3). Die Querkräfte erzeugen in den Gurten Sekundärmomente. Die Gurte werden zusätzlich mit den Primärschnittgrößen beansprucht (siehe Abbildung 6.1).

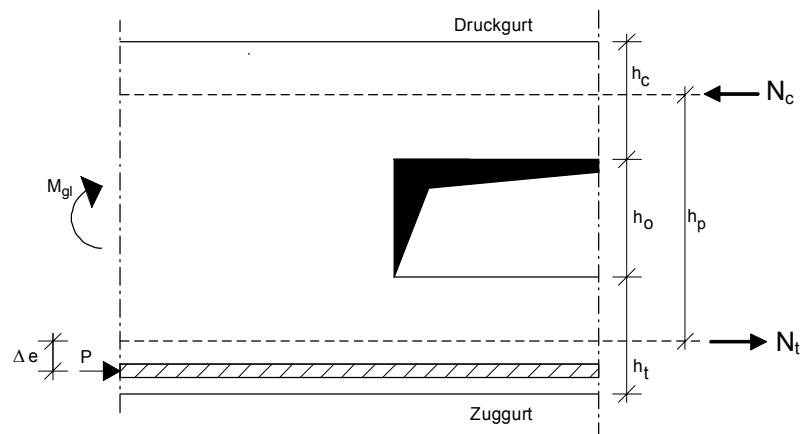


Abbildung 6.1: Berechnung der Gurtnormalkräfte

Die Normalkraft im Druckgurt ergibt sich durch eine Gleichgewichtsbetrachtung:

$$N_c = \frac{P \cdot \Delta e - M_{gl}}{h_p} \quad (6.1)$$

Analog zum Druckgurt ergibt sich die Normalkraft im Zuggurt zu:

$$N_t = \frac{M_{gl} - P \cdot (\Delta e + h_p)}{h_p} \quad (6.2)$$

Mit Hilfe von M-N-Interaktionsdiagrammen für symmetrisch und unsymmetrisch bewehrte Querschnitte können die Gurte mit den ermittelten Schnittgrößen (Sekundärmoment und Normalkraft) bemessen werden (siehe Kapitel 6.2.2).

Um ein vorzeitiges Versagen des Trägers mit Öffnungen zu verhindern, muss die Druckgurthöhe mindestens so groß wie die Höhe des rechteckigen Spannungsblocks nach DIN 1045-1 sein. Dieses bestätigen auch die Versuche von Somes et al. [SOCO74] und die Untersuchungen von Salam [SAHA79]. Die Höhe des Spannungsblocks ergibt sich aus der Bemessung für das globale Biegemoment am Massivträger. Folgende Bedingung ist einzuhalten:

$$h_c \geq \begin{cases} 0,80 \cdot x & \text{für } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2 \\ (1,0 - f_{ck}/250) \cdot x & \text{für } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2 \end{cases} \quad (6.3)$$

Bei Öffnungsgruppen muss zunächst mittels der Berechnung des Grenzöffnungsabstandes unterschieden werden, ob sich zwei Öffnungen gegenseitig beeinflussen (siehe 6.4.1). Wie die eigenen Untersuchungen ergeben haben, ist die Ausbildung der Pfosten zwischen zwei Öffnungen entscheidend im Hinblick auf die Tragfähigkeit. Die Bestimmung der Schnittgrößen sowie der Lage des Momentennulldurchgangs in den Pfosten wird in Kapitel 6.4.2 bzw. 6.4.3 erläutert. Mit den ermittelten Schnittgrößen kann ein Pfosten als eingespannte Stütze bemessen werden. Der Diskontinuitätsbereich seitlich der Öffnungen wird mit einem Fachwerkmodell erfasst (siehe Kapitel 6.7.1). Hierbei ist für das Erreichen der maximalen Traglast die Ausbildung der Aufhängebewehrungen seitlich der Öffnungen maßgebend (siehe Kapitel 6.7.2).

Weiterhin ist der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen. Vor allem bei Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen wird die Durchbiegung nachhaltig von geringeren Steifigkeiten infolge der Öffnungen beeinflusst. Daher wurde ein Ansatz zur Bestimmung der Durchbiegung entwickelt, in dem alle maßgeblichen Einflussparameter berücksichtigt werden. Hinweise zur Beschränkung der Rissbildung werden in Kapitel 6.6.2 gegeben.

6.2.2 M-N-Interaktionsdiagramme

Die Druck- und Zuggurte werden durch ein Sekundärbiegemoment infolge der globalen Querkraft und durch eine Normalkraft infolge des globalen Biegemomentes beansprucht. Zusätzlich kann eine äußere Normalkraft angreifen. Im Allgemeinen ist der Druckgurt symmetrisch bewehrt, während im Zuggurt aufgrund der größeren Längsbewehrung zur Aufnahme des globalen Biegemomentes die Bewehrung unsymmetrisch ist. Bereits [GRKL01; EHM02; MATA99] haben Bemessungsdiagramme für symmetrisch und unsymmetrisch bewehrte Querschnitte entwickelt. Jedoch ergaben sich in den Bemessungsdiagrammen der einzelnen Autoren Widersprüche. Daher wurden die Bemessungsdiagramme überprüft und modifiziert.

Zur Erstellung der M-N-Interaktionsdiagramme wird davon ausgegangen, dass sich der Träger im Zustand II befindet. Es wird weiter angenommen, dass die Bernoulli-Hypothese gültig ist. Die Zugfestigkeit des Betons wird vernachlässigt. Die berücksichtigten Dehnungszustände nach DIN 1045-1 sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Für die Spannungsverteilung im Druckbereich wird wie bei [KMH94] der rechteckige Spannungsblock verwendet (siehe Abbildung 6.3). Die Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

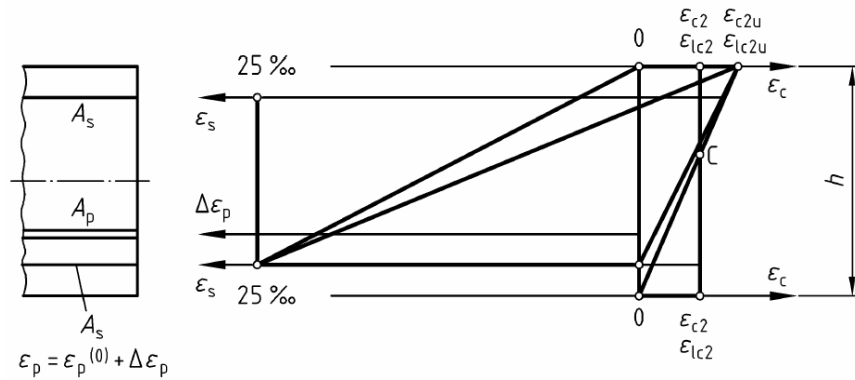


Abbildung 6.2: Dehnungsverteilungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

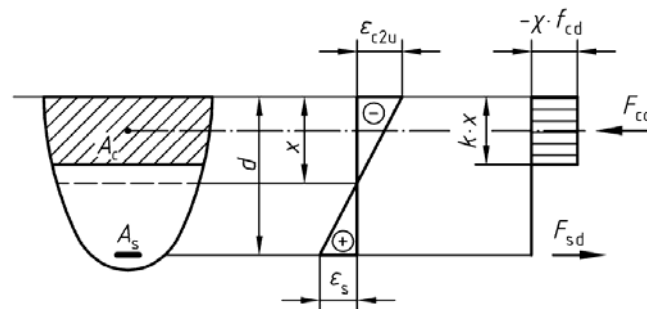


Abbildung 6.3: Spannungsblock nach DIN 1045-1

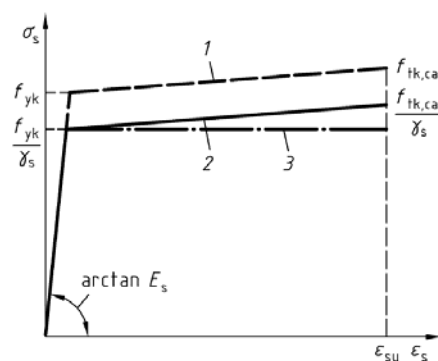


Abbildung 6.4: Spannungs-Dehnungs-Kurve des Betonstahls nach DIN 1045-1
In Anhang C sind in Anlehnung an [EHM02] die modifizierten M-N-Interaktionsdiagramme für symmetrisch und unsymmetrisch bewehrte Querschnitte zur

Bemessung nach DIN 1045-1 dargestellt. Durch den Faktor λ können sowohl symmetrisch als auch unsymmetrisch bewehrte Querschnitte bemessen werden.

$$\lambda = \frac{A_{s,\min}}{A_{s,\min} + A_{s,\max}} \quad (6.4)$$

$\lambda = 0,5$ → symmetrisch bewehrter Querschnitt

$\lambda \leq 0,5$ → unsymmetrisch bewehrter Querschnitt

6.3 Bestimmung der Querkraftverteilung

6.3.1 Einteilung in Lastbereiche

Grundsätzlich verteilt sich die Querkraft auf die Gurte im Verhältnis der tatsächlich vorhandenen Steifigkeiten im Druck- und Zuggurt. Dies wurde durch die eigenen experimentellen und numerischen Untersuchungen bestätigt. Die Problematik liegt in der wirklichkeitsnahen Erfassung der Steifigkeiten bei ansteigender Belastung. Durch die fortschreitende Rissbildung in den Gurten werden die Steifigkeiten nachhaltig reduziert. Somit ist die Querkraftverteilung abhängig von der äußeren Belastung. Daher wird die Verteilung der Querkraft auf die Gurte analog zu dem Bemessungskonzept nach Ehmann [EHM02] in charakteristische Lastbereiche unterteilt. Eine Einteilung in drei maßgebliche Lastbereiche genügt, um den Verlauf wirklichkeitsnah zu erfassen (siehe Abbildung 6.5). Die Eignung dieser Unterteilung konnte in den experimentellen und numerischen Untersuchungen nachgewiesen werden.

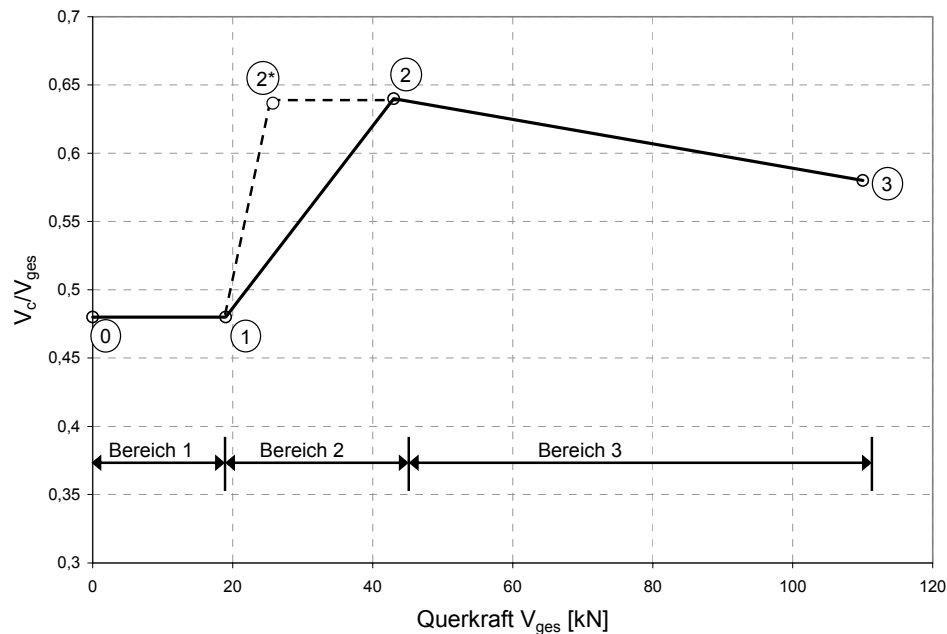


Abbildung 6.5: Unterteilung der Querkraftverteilung in charakteristische Lastbereiche

Im Folgenden wird die Bestimmung der Querkraft in den Gurten für den jeweiligen Lastbereich beschrieben. Hierbei dienen als Grundlage die Berechnungen der Querkraftverteilung nach Ehmann [EHM02] für die ersten beiden Lastbereiche, da diese den Verlauf der Querkraftverteilung wirklichkeitsgetreu wiedergeben können. Allerdings ist in diesem Konzept keine äußere Normalkraft berücksichtigt. Dieser Ansatz wird daher für den Fall einer zusätzlich angreifenden Normalkraft aus äußeren Lasten oder aus Vorspannung erweitert.

Die Bestimmung der Steifigkeiten im Lastbereich 3 erfolgt nach Ehmann iterativ und ist somit vergleichsweise sehr aufwendig. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein vereinfachter Ansatz zur Bestimmung der Steifigkeiten im Lastbereich 3 bis zur Entstehung des ersten Fließgelenkes entwickelt.

6.3.2 Effektive Steifigkeiten in den Gurten

6.3.2.1 Vorschläge aus der Literatur zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit im Zuggurt

Zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit im Zuggurt liegt in der Literatur nur ein Vorschlag von [GKQ79] vor. Hierbei erfolgt die Bestimmung der effektiven Steifigkeit in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades. Die Beanspruchung wird nicht berücksichtigt. Die folgende Formel wurde für einen Träger unter Biegebeanspruchung mit zusätzlicher Zugnormalkraft entwickelt:

$$\chi_t = 15 \cdot (\mu_u + \mu_o) \quad (6.5)$$

Mit:

χ_t Abminderungsfaktor

μ_u Bewehrungsgrad für die untere Lage

$$\mu_u = \frac{A_{s,unten}}{b \cdot d} \quad (6.6)$$

μ_o Bewehrungsgrad für die obere Lage

$$\mu_o = \frac{A_{s,oben}}{b \cdot d} \quad (6.7)$$

Für vorwiegend biegebeanspruchte Bauteile im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit können die Steifigkeiten nach Gerster et al. [GRTH91] bestimmt werden. Der Ansatz wurde zur Ermittlung von Zwangsschnittgrößen entwickelt, so dass die effektiven Steifigkeiten auf der sicheren Seite liegend tendenziell zu groß gewählt wurden. Die effektive Steifigkeit ergibt sich aus Multiplikation der Steifigkeit im Zustand I mit dem Abminderungsfaktor χ aus Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Ermittlung des Abminderungsfaktors χ für den Zugbereich nach [GRTH91]

| Bezogene Längskraft n | Bewehrungsgrad μ [%] | Abminderungsfaktor χ |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| $n \leq +0,15$ | $\mu \leq 0,6$ | 1,0 |
| | $\mu > 0,6$ | 0,65 |
| $n > +0,15$ | alle μ | $0,2+0,06 (\mu_u+\mu_o)$ |

6.3.2.2 Vorschläge aus der Literatur zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit im Druckgurt

Für die Bestimmung der effektiven Steifigkeit eines Bauteils unter Biegung und Längsdruck sind verschiedene Vorschläge aus der Literatur vorhanden. Voraussetzung ist hierbei eine annähernd symmetrische Bewehrung des Bauteils.

Auch für den Druckbereich haben Gerster et al. [GRTH91] Formeln zur Ermittlung der effektiven Steifigkeit aufgestellt (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Ermittlung des Abminderungsfaktors χ für den Druckbereich nach [GRTH91]

| Bezogene Längskraft n | Bewehrungsgrad μ [%] | Abminderungsfaktor χ |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| $n < -0,15$ | alle μ | 1,0 |
| $n \leq -0,15$ | $\mu \leq 0,6$ | 1,0 |
| | $\mu > 0,6$ | 0,65 |

Kordina [GKQ79] bestimmt die effektive Steifigkeit in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades.

Unter Gebrauchslast:
$$\chi_c = 0,6 + 15 \cdot (\mu_u + \mu_o) \quad (6.8)$$

Unter Bruchlast:
$$\chi_c = 0,2 + 15 \cdot (\mu_u + \mu_o) \quad (6.9)$$

Irle [IRL74] entwickelte ein Konzept, in dem der Bewehrungsgrad, die Lage der Bewehrung sowie die Ausmittigkeit der Normalkraft berücksichtigt werden. Es gilt:

$$\chi_c = a + b \cdot (\mu_u + \mu_o) \quad (6.10)$$

Mit

- a Faktor in Abhängigkeit der Ausmittigkeit (siehe Abbildung 6.6)
- b Faktor in Abhängigkeit des Baustahls und der Lage der Bewehrung (siehe Abbildung 6.6)

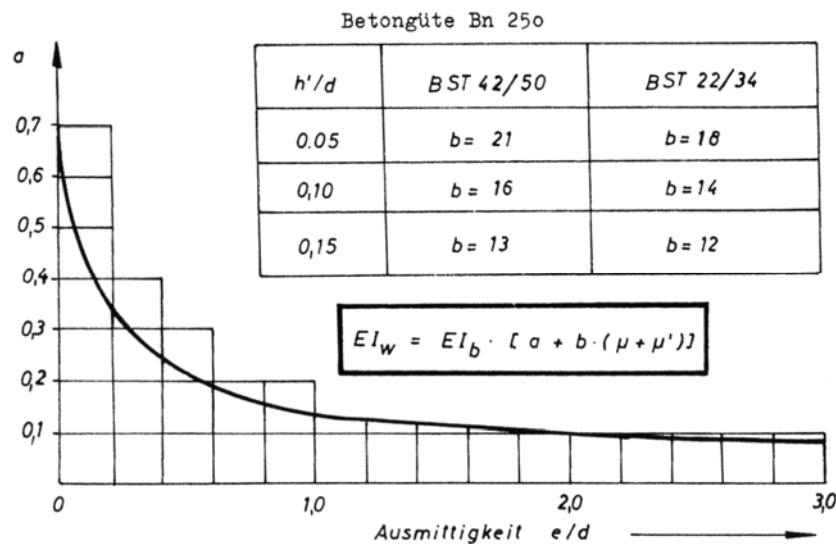


Abbildung 6.6: Bestimmung der Faktoren a und b

Janko [JAN72] stellte in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades und der einwirkenden Drucknormalkraft folgende Gleichung auf:

$$\chi_c = 0,6 - 2 \left(n_{c,j} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left[1 - \left(\frac{n_{c,j}}{2} \right)^2 \right] \cdot \left[(\mu_o + \mu_u) \frac{d}{h} \cdot \frac{f_{yk}}{f_{ck}} - 0,05 \right] \quad (6.11)$$

Mit:

$n_{c,j}$ Bezogene Längskraft im Druckgurt nach Janko

$$n_{c,j} = \frac{N}{b \cdot h \cdot f_{ck}} \cdot \frac{1}{1 + (\mu_o + \mu_u) \frac{d}{h} \cdot \frac{f_{yk}}{f_{ck}}} \quad (6.12)$$

6.3.2.3 Untersuchungen zur effektiven Steifigkeit

Zur Bestimmung der Querkraftverteilung wird die wirklichkeitsnahe Ermittlung der effektiven Steifigkeiten sowohl im Zuggurt als auch im Druckgurt in Abhängigkeit des Bewehrungsgrades und der Belastung erforderlich.

Es gilt allgemein:

$$(EI)_{\text{eff}} = \chi \cdot E_I I_I \quad (6.13)$$

Mit

$(EI)_{\text{eff}}$ Effektive Steifigkeit

χ Abminderungsbeiwert

E_I Elastizitätsmodul im Zustand I

I_I Flächenträgheitsmoment im Zustand I

Leonhardt [LEO77a] untersuchte bereits die Auswirkungen einer äußeren Belastung auf die effektive Steifigkeit. Wie Abbildung 6.7 zeigt, hat auch die äußere Belastung einen wesentlichen Einfluss auf die effektive Steifigkeit.

Es gilt:

$$m = \frac{M}{b \cdot d^2 \cdot f_c} \quad (6.14)$$

$$n = \frac{N}{b \cdot d \cdot f_c} \quad (6.15)$$

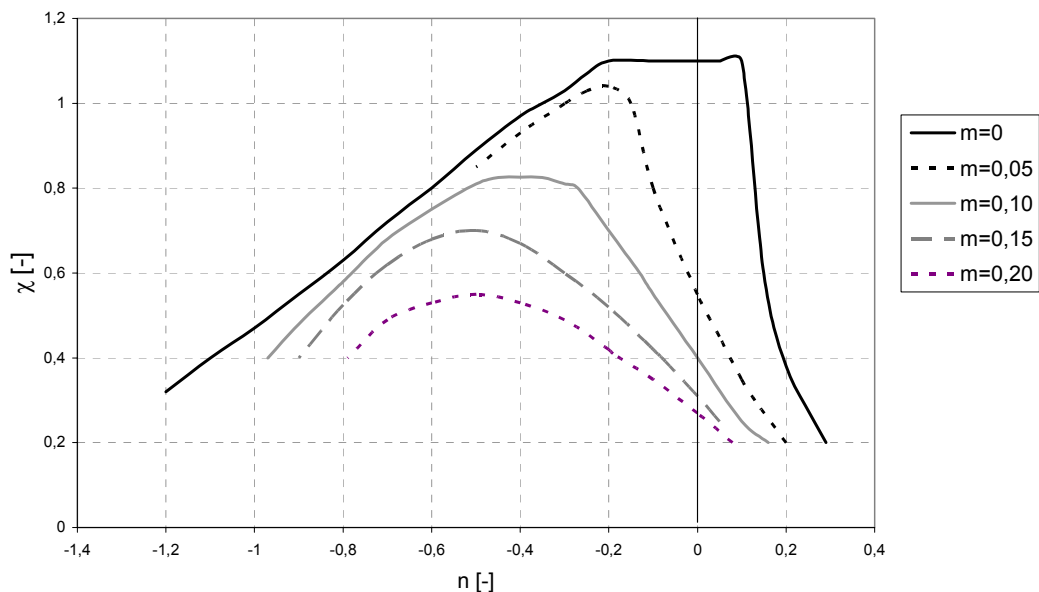


Abbildung 6.7: Effektive Steifigkeit nach [LEO77a] mit $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $\mu = 1\%$

Um die Ergebnisse von Leonhardt zu verifizieren und zu erweitern, wurden eigene Untersuchungen zur Entwicklung der effektiven Steifigkeit vorgenommen. Hierbei wurden die Öffnungsurte als beidseitig eingespanntes System abgebildet (siehe Abbildung 6.8). Die Lage des Momentennulldurchgangs wurde vereinfachend in Öffnungsmitte angenommen.

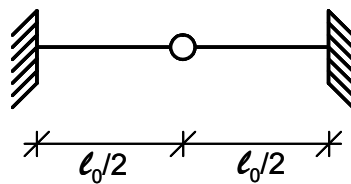


Abbildung 6.8: Vereinfachtes statisches System der Gurte

Als Belastung wirkt eine Gesamtnormalkraft, die sich zusammensetzt aus einer Normalkraft in den Gurten infolge des globalen Biegemomentes und aus einer zusätzlichen Normalkraft infolge äußerer Lasten oder Vorspannung. Die Normalkraft infolge des globalen Biegemomentes kann sowohl als Zugkraft als auch als Druckkraft für den jeweiligen Gurt wirken. Weiterhin entsteht aus der Verteilung der globalen

Querkraft auf die Gurte eine anteilige Querkraft im jeweiligen Gurt (siehe Abbildung 6.9).

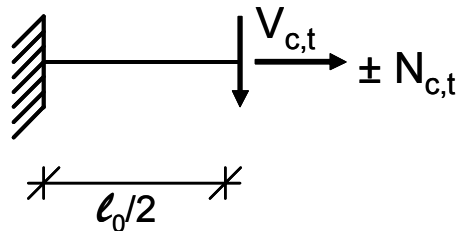


Abbildung 6.9: Belastung der Gurte

Mit diesem vereinfachten System wurden Berechnungen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens von Beton und Stahlbeton nach [PFE04] durchgeführt. Der Druckbereich von Beton wurde über einen parabelförmigen Verlauf nach DIN 1045-1 abgebildet. Im Zugbereich wurde nach Quast [GKQ79] die Mitwirkung der gerissenen Zugzone berücksichtigt. Für den Zuggurt wurde aufgrund der globalen Längsbewehrung eine unsymmetrische Bewehrung gewählt, während der Druckgurt eine symmetrische Bewehrung aufwies.

In Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 ist in Abhängigkeit der bezogenen Normalkraft n und des bezogenen Biegemomentes m die effektive Steifigkeit für den Zuggurt und für den Druckgurt aufgetragen. Durch Vergrößerung des Bewehrungsgrades erhöht sich die effektive Steifigkeit. Im Zuggurt ist die effektive Steifigkeit aufgrund der Rissbildung insgesamt geringer. Zudem ist der Verlauf wesentlich steiler im Vergleich zur effektiven Steifigkeit im Druckgurt.

Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage des entwickelten Ingenieurmodells zur Bestimmung der Querkraftverteilung (siehe Kapitel 6.3.3.4).

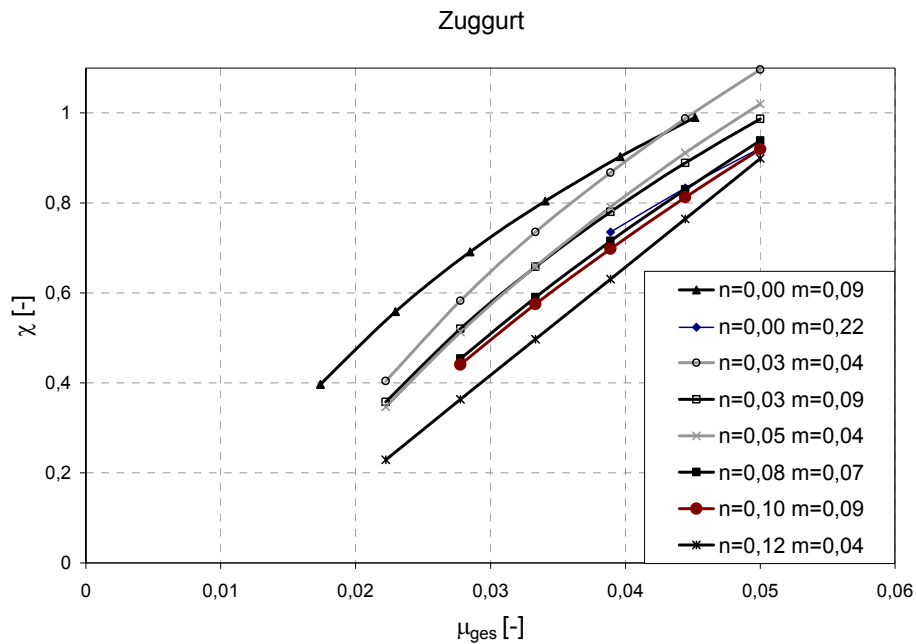


Abbildung 6.10: Abminderungsfaktor zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit in Abhängigkeit der einwirkenden Zugnormalkraft und des einwirkenden Biegemomentes

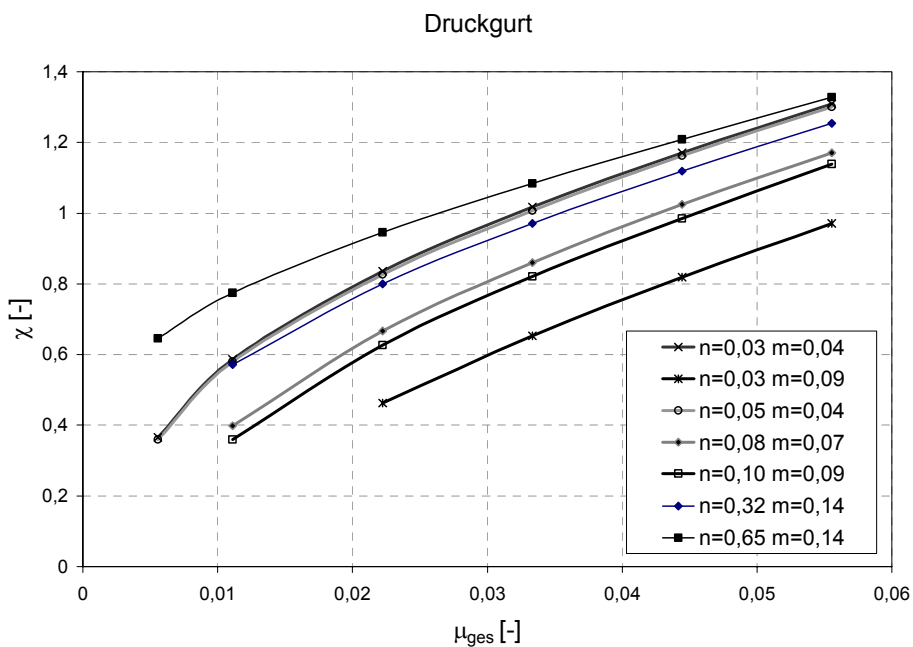


Abbildung 6.11: Abminderungsfaktor zur Bestimmung der effektiven Steifigkeit in Abhängigkeit der einwirkenden Drucknormalkraft und des einwirkenden Biegemomentes

6.3.3 Berechnung der effektiven Steifigkeiten für die einzelnen Lastbereiche

6.3.3.1 Vorbemerkungen

Aufbauend auf den eigenen Untersuchungen und den Arbeiten anderer Forscher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Vorschlag zur Bestimmung der Querkraftverteilung entwickelt. Hierbei kann eine zusätzliche Normalkraft berücksichtigt werden. Der Verlauf der Querkraftverteilung wird wie bereits erwähnt in drei Lastbereiche unterteilt, die im Folgenden vorgestellt werden.

6.3.3.2 Lastbereich 1

Im Lastbereich 1 verhalten sich die Gurte linear-elastisch. D.h. die Querkraft verteilt sich in Abhängigkeit des Verhältnisses der Gurtsteifigkeiten:

$$\frac{V_c^{(1)}}{V_{\text{tot}}^{(1)}} = \frac{I_{i,c}}{I_{i,c} + I_{i,t}} \quad (6.16)$$

Mit:

$$I_{i,t} \quad \text{Flächenträgheitsmoment im Zuggurt, Zustand I} \\ I_{i,t} = I_t + (n-1) \cdot (A_{s1} \cdot z_{s1}^2 + A_{s2} \cdot z_{s2}^2) + (n_p - 1) \cdot A_{p,1} \cdot z_{p,1}^2 \quad (6.17)$$

$$I_{i,c} \quad \text{Flächenträgheitsmoment im Druckgurt, Zustand I} \\ I_{i,c} = I_c + (n-1) \cdot (A_{s3} \cdot z_{s3}^2 + A_{s4} \cdot z_{s4}^2) + (n_p - 1) \cdot A_{p,2} \cdot z_{p,2}^2 \quad (6.18)$$

$$n_s \quad \text{Verhältnis der Elastizitätsmoduli von Betonstahl und Beton} \\ n_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (6.19)$$

$$n_p \quad \text{Verhältnis der Elastizitätsmoduli von Spannstahl und Beton} \\ n_p = \frac{E_p}{E_c} \quad (6.20)$$

Der Lastbereich 1 endet mit Einsetzen der Rissbildung im Zuggurt bei Überschreitung der Biegezugfestigkeit. Die Biegezugfestigkeit ist abhängig vom vorhandenen Spannungsgradienten im Querschnitt [HAR77]. Ein großes globales Biegemoment

erzeugt eine dementsprechend große Normalkraft in den Gurten. Das heißt, in den Gurten überwiegt eine zentrische Beanspruchung. Um den Spannungsgradienten auf die Biegezugfestigkeit zu berücksichtigen, gilt nach Ehmann [EHM02] vereinfachend für den Zuggurt:

$$f_{ct,fl} = 1,2 \cdot f_{ctm} \quad (6.21)$$

Im Druckgurt entstehen durch die Sekundärmomente Zugspannungen. Die Biegezugfestigkeit für den Druckgurt errechnet sich in Abhängigkeit der Öffnungslage bzw. der Beanspruchungsart der Gurte nach Ehmann [EHM02] zu:

$$f_{ct,fl} = 1,2 \cdot f_{ctm} \quad \text{für} \quad \frac{M}{V} = 0 \quad (6.22)$$

$$f_{ct,fl} = 1,5 \cdot f_{ctm} \quad \text{für} \quad 0 < \left| \frac{M}{V} \right| < 0,5 \quad (6.23)$$

$$f_{ct,fl} = 2,0 \cdot f_{ctm} \quad \text{für} \quad 0,5 < \left| \frac{M}{V} \right| \quad (6.24)$$

Der Zeitpunkt der Erstrissbildung ergibt sich mit Hilfe folgender Bedingung:

$$\sigma_c = \frac{N_{gl,t}}{A_{i,t}} + \frac{M_{sek,t}}{W_{i,t}} = f_{ct,fl} \quad (6.25)$$

Die Normalkraft $N_{gl,t}$ im Zuggurt setzt sich aus dem Anteil des globalen Biegemomentes und der Normalkraft infolge einer äußeren Belastung und/oder infolge Vorspannung zusammen. Das im Zuggurt wirkende Moment $M_{sek,t}$ entsteht durch den Anteil der globalen Querkraft im Zuggurt. Durch Einsetzen und Umformen bestimmt sich die Querkraft beim Eintreten der Erstrissbildung unter Berücksichtigung einer zusätzlich angreifenden Normalkraft wie folgt:

$$V_{tot}^{(l)} = \frac{f_{ct,fl} - \frac{N_t}{A_{i,t}}}{\frac{\eta}{A_{i,t} \cdot h_p} + \frac{\left(1 - \frac{V_c^{(l)}}{V_{tot}^{(l)}}\right) \cdot l_0 \cdot h_t}{4 \cdot I_{i,t}}} \quad (6.26)$$

Mit

$f_{ct,\Pi}$ Biegezugfestigkeit im Zuggurt

N_t Normalkraft im Zuggurt infolge einer äußeren Belastung und/oder infolge Vorspannung (Zug positiv)

$A_{i,t}$ Ideeller Querschnitt des Zuggurtes

$$A_{i,t} = b_t \cdot h_t + (n_s - 1) \cdot (A_{s1} + A_{s2}) + (n_p - 1) \cdot A_{p,1} \quad (6.27)$$

η Lage der Öffnung [m]

$$\eta = \left| \frac{M}{V} \right| = \text{const.} \quad (6.28)$$

h_p Abstand der Schwerpunkte der Öffnungsgurte

$\frac{V_c^{(1)}}{V_{\text{tot}}^{(1)}}$ Querkraftanteil im Druckgurt nach Gleichung 6.16

l_0 Öffnungslänge

h_t Höhe des Zuggurtes

$I_{i,t}$ Flächenträgheitsmoment im Zuggurt, Zustand I (siehe Gleichung 6.17)

6.3.3.3 Lastbereich 2

Im Lastbereich 2 wird aufgrund der abfallenden Steifigkeit des Zuggurtes infolge fortschreitender Rissbildung die zusätzlich aufgebrachte Querkraft allein vom Druckgurt aufgenommen.

$$\frac{V_c^{(2)}}{V_{\text{tot}}^{(2)}} = \frac{V_{\text{tot}}^{(2)} - V_t^{(1)}}{V_{\text{tot}}^{(2)}} \quad (6.29)$$

Der Lastbereich 2 endet entweder mit Einsetzen der Rissbildung im Druckgurt (siehe Gleichung 6.30) oder bei großer Biegebeanspruchung mit Bildung von Trennrissen im Zuggurt (siehe Gleichung 6.32). Im letzteren Fall ändern sich die Steifigkeiten der Gurte innerhalb des Lastbereichs 2 nicht. Der Zuggurt ist vollständig gerissen. Somit ist ein weiterer Steifigkeitsverlust nicht möglich, während der Druckgurt im Zustand I bleibt.

$$V_{\text{tot}}^{(2)} = \frac{f_{\text{ct,fl}} + \frac{V_t^{(1)} \cdot l_0 \cdot h_c}{4 \cdot I_{i,c}} - \frac{N_c}{A_{i,c}}}{\frac{l_0 \cdot h_c}{4 \cdot I_{i,c}} - \frac{\eta}{A_{i,c} \cdot h_p}} \quad (6.30)$$

Mit

$f_{\text{ct,fl}}$ Biegezugfestigkeit im Druckgurt

$V_t^{(1)}$ Querkraft im Zuggurt zum Zeitpunkt der Erstrissbildung

$$V_t^{(1)} = V_{\text{tot}}^{(1)} \cdot \left(1 - \frac{V_c^{(1)}}{V_{\text{tot}}^{(1)}} \right) \quad (6.31)$$

l_0 Öffnungslänge

h_c Höhe des Druckgurtes

$I_{i,c}$ Flächenträgheitsmoment im Druckgurt, Zustand I (siehe Gleichung 6.18)

N_c Normalkraft im Druckgurt infolge einer äußeren Belastung und/oder infolge Vorspannung (Zug positiv)

$A_{i,c}$ Ideeller Querschnitt des Druckgurtes

$$A_{i,c} = b_c \cdot h_c + (n_s - 1) \cdot (A_{s3} + A_{s4}) + (n_p - 1) \cdot A_{p,2} \quad (6.32)$$

η Lage der Öffnung [m] (siehe Gleichung 6.28)

Für die Querkraft zum Zeitpunkt des zentrischen Aufreißen des Zuggurtes gilt:

$$V_{\text{tot}}^{(2*)} = \frac{(f_{\text{ctm}} \cdot A_{i,t} - N_t) \cdot h_p}{\eta} \quad (6.33)$$

6.3.3.4 Lastbereich 3

Der Lastbereich 3 beginnt mit dem Aufreißen des Druckgurtes und endet mit dem Erreichen der Traglast. Aus den eigenen Untersuchungen wurden Formeln zur Bestimmung der effektiven Steifigkeiten in Abhängigkeit der aufgebrachten Belastung und der vorhandenen Bewehrungsmenge entwickelt.

Für den **Zuggurt** wird der Vorschlag von [GKQ79] für einen Träger unter Biegebeanspruchung mit zusätzlicher Zugnormalkraft aufgrund von empirischen Auswertungen der FE-Berechnungen erweitert, so dass durch eine einwirkende Zugkraft die effektive Steifigkeit mit dem Abminderungsbeiwert χ_t reduziert wird:

$$\chi_t = 15 \cdot (\mu_u + \mu_o) - 0,25 + (n_t - 0,5)^2 \quad (6.34)$$

Mit

n_t Bezogene Normalkraft im Zuggurt

$$n_t = \frac{|N_t|}{b \cdot d \cdot f_c} \quad (6.35)$$

Voraussetzung zur Verwendung von Gleichung 6.34 ist eine unsymmetrische Bewehrungsführung, die aufgrund der globalen Längsbewehrung typisch für einen Zuggurt ist.

Für den **Druckgurt** ist unter Berücksichtigung der eigenen Untersuchungen folgende Gleichung unter der Annahme einer symmetrischen Bewehrung empirisch ermittelt worden:

$$\chi_c = 15 \cdot (\mu_u + \mu_o) + 0,4 - (n_c - 0,5)^2 \quad (6.36)$$

Mit

n_c Bezogene Normalkraft im Druckgurt

$$n_c = \frac{|N_c|}{b \cdot d \cdot f_c} \quad (6.37)$$

Wenn die Steifigkeit des Zuggurtes mit Hilfe des Abminderungsbeiwertes aus Gleichung 6.34 und die Steifigkeit des Druckgurtes mit Hilfe des Abminderungsbeiwertes aus Gleichung 6.36 bestimmt wurden, ermittelt sich der Anteil der Querkraft auf den Druckgurt im Lastbereich 3 wie folgt:

$$\frac{V_c^{(3)}}{V_{\text{tot}}^{(3)}} = \frac{\chi_c}{\chi_c + \chi_t} \quad (6.38)$$

Falls eine Gleichstreckenbelastung im Bereich der Öffnungen vorliegt, wird diese analog zur Querkraft auf die Gurte für den jeweiligen Lastbereich aufgeteilt. Der entwickelte Bemessungsvorschlag zur Bestimmung der Querkraftverteilung ist auch für vorgespannte Bauteile mit Öffnungen geeignet. Die Vorspannkraft geht als Normalkraft in die Berechnung der effektiven Steifigkeiten ein.

6.3.4 Verifizierung des vereinfachten Bemessungskonzeptes

Das vereinfachte Konzept wurde entwickelt, um die Praxistauglichkeit bei der Anwendung und Handhabung zu gewährleisten. Im Folgenden wird das vereinfachte Bemessungskonzept dem Konzept nach Ehmann gegenübergestellt und mittels der Versuchsergebnisse und den nichtlinearen FE-Berechnungen verifiziert. In Abbildung 6.12 bis Abbildung 6.17 ist die Querkraftverteilung aus den Versuchsergebnissen und den FE-Berechnungen im Vergleich zu dem eigenen Konzept und dem ursprünglichen Konzept nach Ehmann dargestellt.

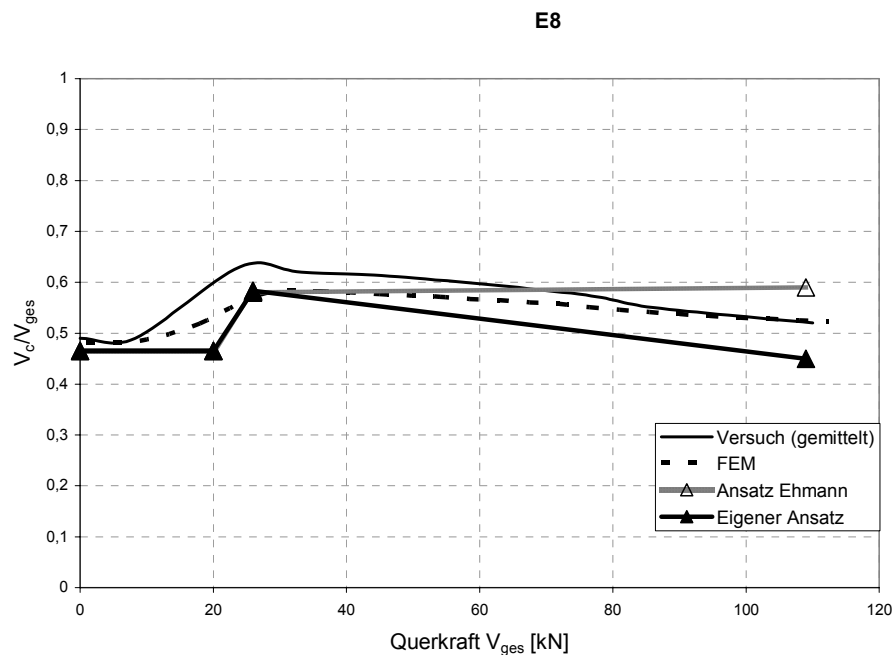


Abbildung 6.12: Querkraftverteilung des Trägers E8

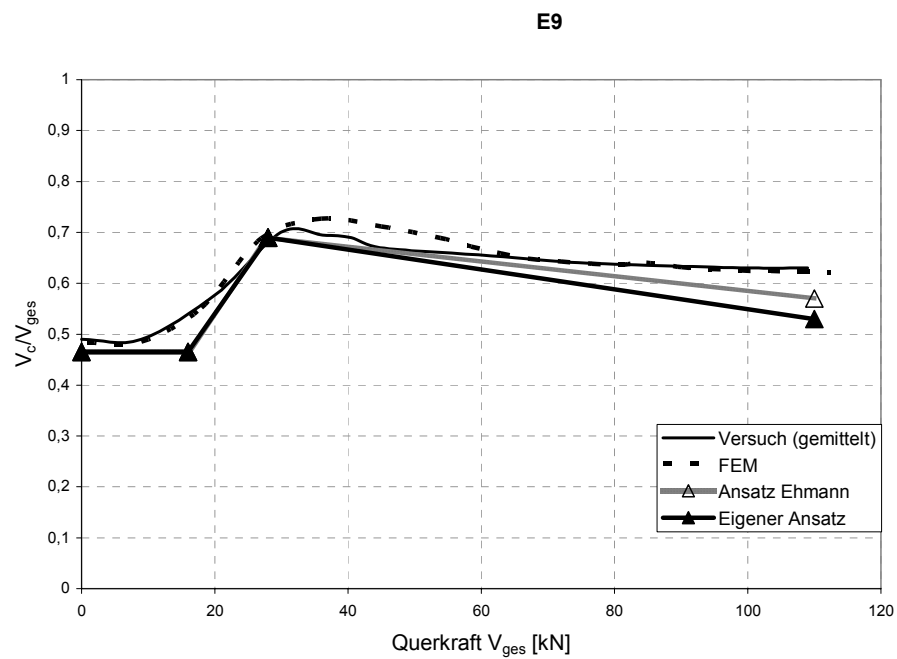


Abbildung 6.13: Querkraftverteilung des Trägers E9

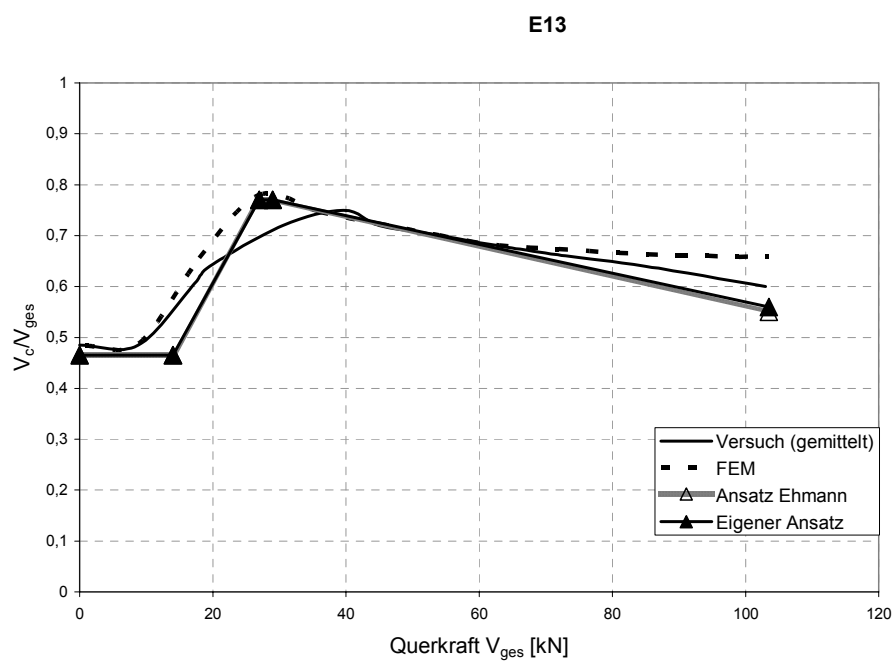


Abbildung 6.14: Querkraftverteilung des Trägers E13

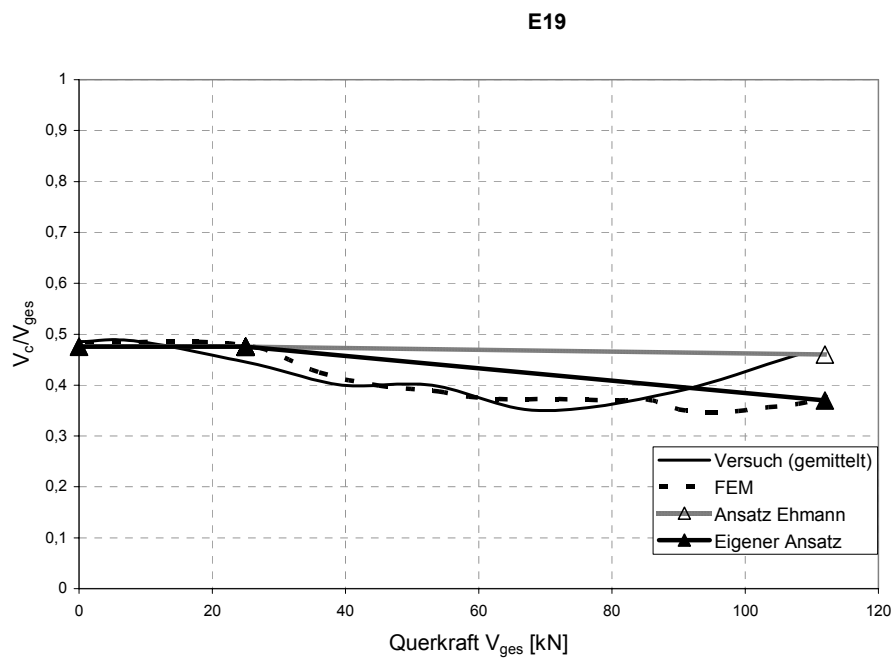


Abbildung 6.15: Querkraftverteilung des Trägers E19

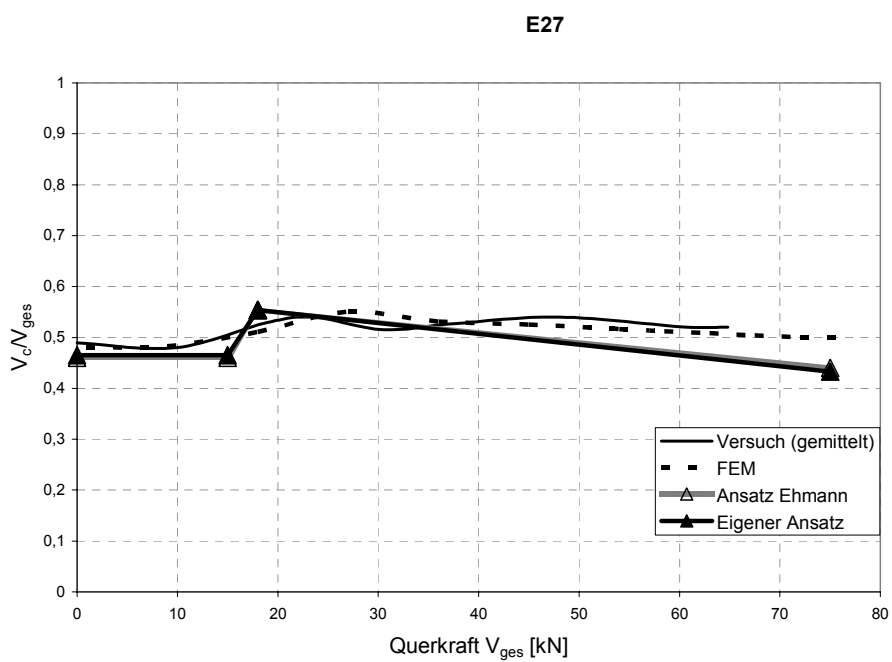


Abbildung 6.16: Querkraftverteilung des Trägers E27

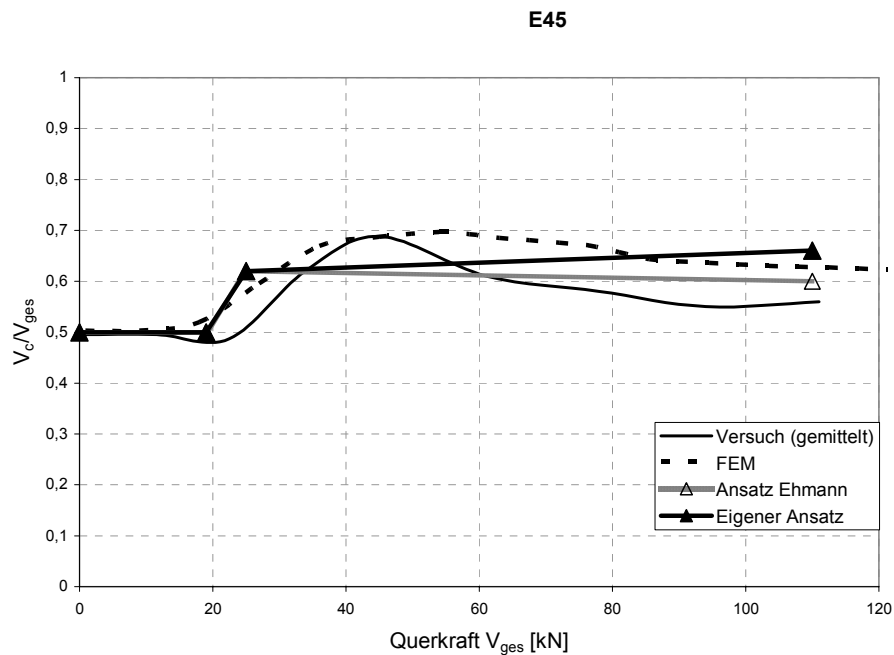


Abbildung 6.17: Querkraftverteilung des Trägers E45

Insgesamt sind kaum Unterschiede zwischen dem vereinfachten Konzept und dem Konzept nach Ehmann zu erkennen. Sowohl im Bereich der Erstrissbildung als auch im Versagensbereich sind gute Übereinstimmungen der Konzepte mit den Versuchsergebnissen und den FE-Berechnungen vorhanden.

Das vereinfachte Konzept wurde weiterhin mit den FE-Berechnungen von Ehmann und dem Konzept nach Ehmann verglichen (siehe Abbildung 6.18 bis Abbildung 6.20). Auch hier ist bei sämtlichen Trägern eine gute Übereinstimmung der Konzepte mit den FE-Berechnungen erkennbar. Die größten Abweichungen entstehen für $\alpha_t = 0,13$. Der Zuggurt ist stark bewehrt und besitzt somit innerhalb des Tragsystems eine große Biegesteifigkeit. In den von Ehmann durchgeführten FE-Berechnungen kann diese Biegesteifigkeit aufgrund der verschmierten Abbildung der Bewehrung nicht vollständig erfasst werden. Somit wird die Tragfähigkeit des Zuggurtes innerhalb der FE-Berechnungen unterschätzt. Das vereinfachte Konzept und das Konzept nach Ehmann besitzen untereinander nur geringfügige Abweichungen, die vernachlässigbar sind.

Vorteile ergeben sich beim vereinfachten Konzept in der Zeitersparnis. Vor allem für die Handrechnung ist daher dieses Konzept geeignet. Weiterhin ermöglicht das Konzept

eine Transparenz für den Anwender, da die einzelnen Schritte nachvollziehbar sind. Mit dem vereinfachten Konzept kann somit die Querkraftverteilung wirklichkeitsgetreu und zielsicher ohne iterative Betrachtung der Problemstellung bestimmt werden.

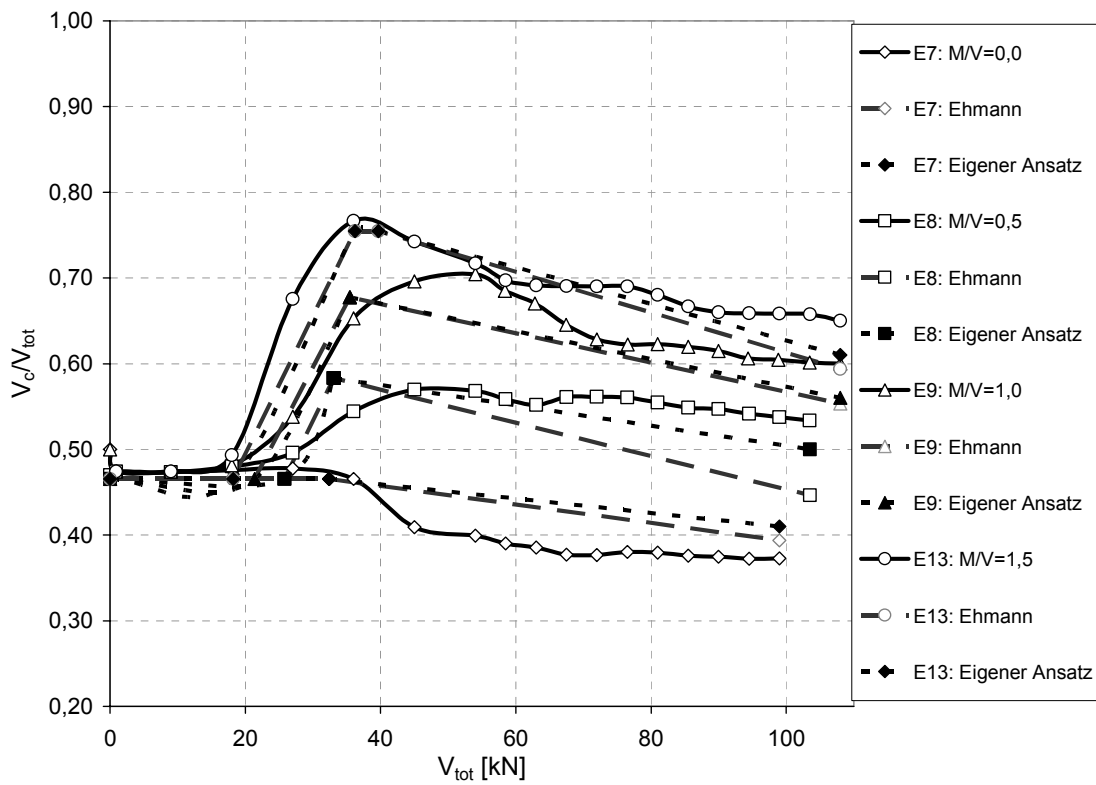
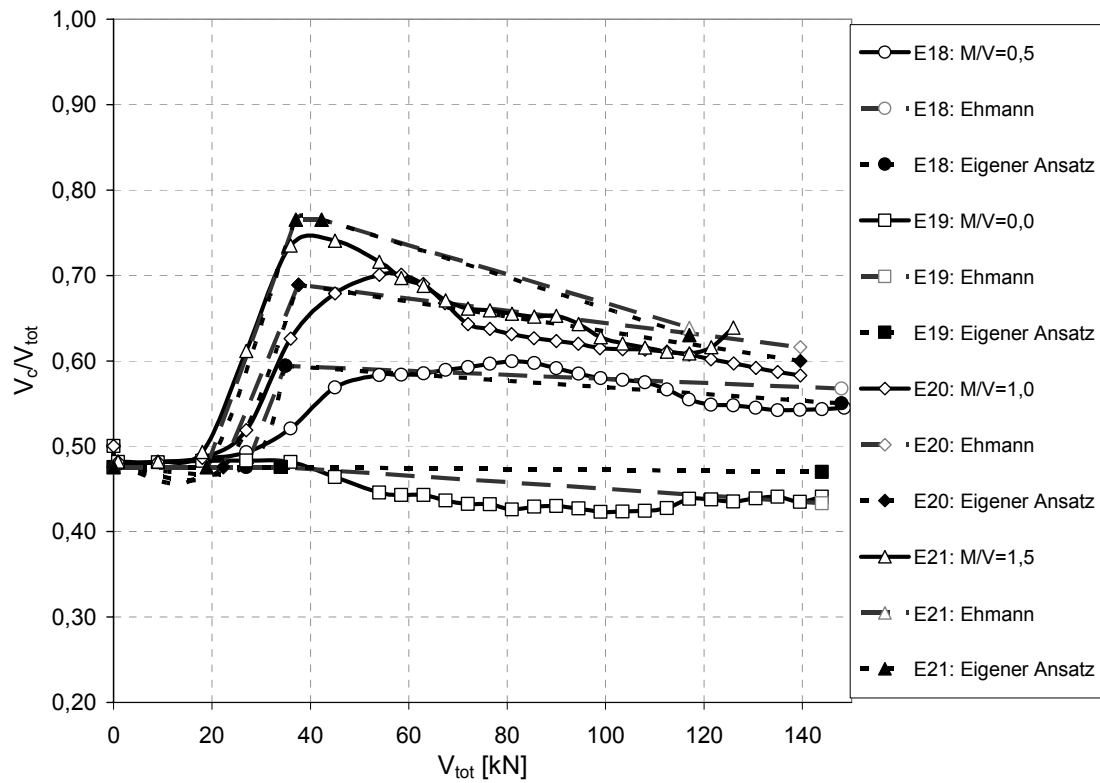
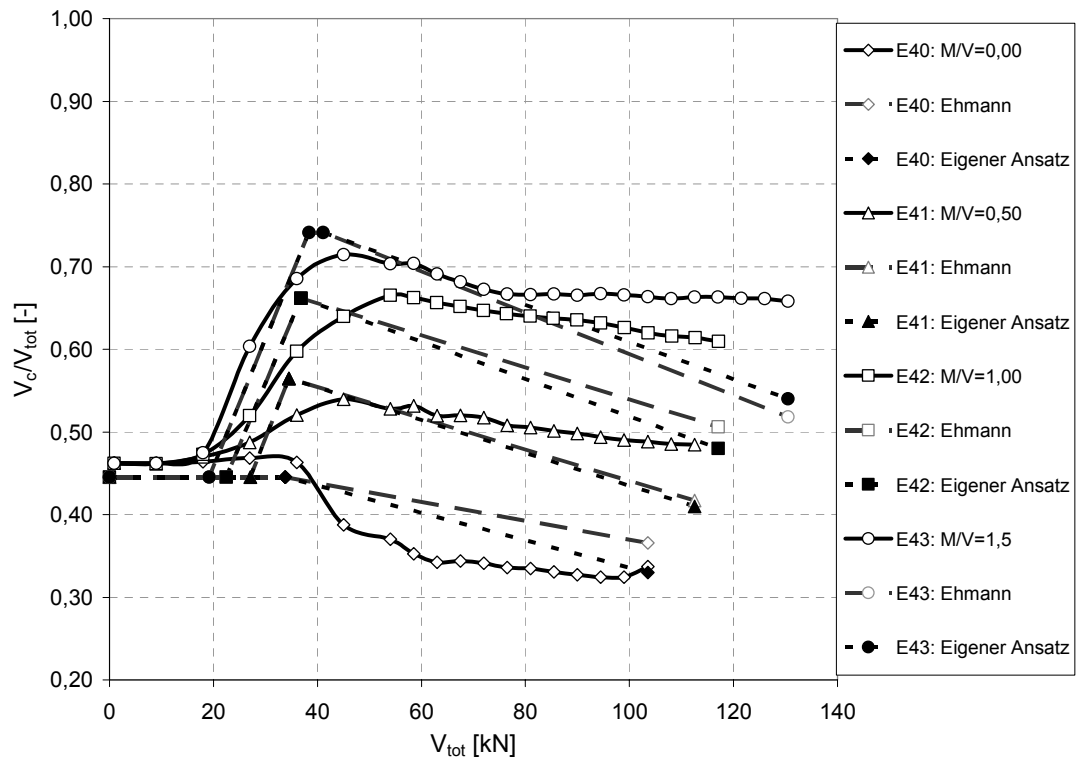


Abbildung 6.18: Querkraftverteilung für verschiedene M/V -Verhältnisse ($\alpha_t=0,19$)

Abbildung 6.19: Querkraftverteilung für verschiedene M/V-Verhältnisse ($\alpha_t=0,29$)Abbildung 6.20: Querkraftverteilung für verschiedene M/V-Verhältnisse ($\alpha_t=0,13$)

Bei Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Öffnungsgruppen ergaben die numerischen Untersuchungen, dass sich die Querkraft eines entsprechenden Trägers mit einer Öffnungsgruppe prinzipiell genauso verteilt wie bei einem Träger mit einer Einzelöffnung (siehe Abbildung 5.36). Dieses Verhalten bestätigen auch die Untersuchungen von Mansur und Tan [MATA99].

Die Öffnung mit dem größten M/V-Verhältnis innerhalb einer Öffnungsgruppe erfährt die gleiche Querkraftverteilung wie eine Einzelöffnung. Das heißt, die Querkraftverteilung ermittelt sich nach dem Ingenieurmodell aus Kapitel 6.3. Die Querkraftverteilungen der übrigen Öffnungen sind zum Zeitpunkt der Erstrissbildung im Druckgurt (Punkt 2) um ca. 5 bis 10% geringer als eine vergleichbare Einzelöffnung mit identischem M/V-Verhältnis (siehe Abbildung 6.21).

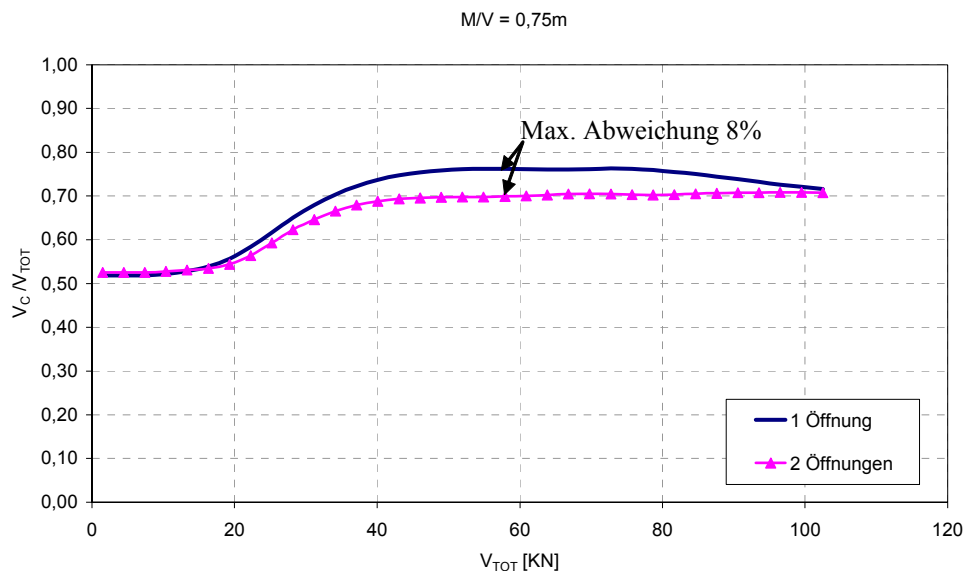


Abbildung 6.21: Querkraftverteilung – Träger mit Einzelöffnung im Vergleich zu Träger mit zwei Öffnungen

Auf der sicheren Seite liegend kann daher die Abweichung vernachlässigt werden. Im Bereich der Entstehung des ersten Fließgelenkes sind die Querkraftverteilungen wieder identisch. Somit kann bei der Ermittlung der Querkraftverteilung jede Öffnung innerhalb der Öffnungsgruppe einzeln betrachtet werden. Voraussetzung ist hierbei, dass der Grenzöffnungsabstand, ab welchem zwei Öffnungen wie eine Einzelöffnung wirken, nach Gleichung 6.40 (siehe Kapitel 6.4.1) nicht unterschritten wird. Mit dem jeweiligen M/V-Verhältnis ist die Bestimmung der Querkraftverteilung für Öffnungen innerhalb einer Gruppe analog zur Einzelöffnung durchzuführen.

6.4 Besonderheiten bei der Bemessung von Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen

6.4.1 Grenzöffnungsabstände

Innerhalb der eigenen umfangreichen FE-Berechnungen wurde untersucht, ab welchem Öffnungsabstand benachbarte Öffnungen unabhängig voneinander betrachtet werden können. Hierzu wurde der Einfluss des Öffnungsabstandes auf die Versagenslast und die zugehörige Durchbiegung untersucht (vgl. Kapitel 5.3.3). Die Ergebnisse zeigten, dass für die Pfostenbreite x_p zwischen zwei Öffnungen folgende Gleichung gelten muss, damit sich das Tragverhalten eines Balkens mit mehreren unabhängig voneinander wirkenden Einzelöffnungen einstellt:

$$x_p \geq 0,8 \cdot h \quad (6.39)$$

Wird diese Pfostenbreite unterschritten, wirken die Öffnungen zusammen als eine Öffnungsgruppe. Zwischen den Öffnungen kann sich keine Druckstrebe mehr ausbilden, so dass sich ein Rahmentragverhalten einstellt.

Weiterhin haben die FE-Berechnungen gezeigt, dass sich bei Unterschreitung einer gewissen Pfostenbreite zwei Öffnungen wie eine große Einzelöffnung verhalten. Hierbei gilt:

$$x_p \leq 0,1 \cdot h \quad (6.40)$$

Der Pfosten muss weiterhin so breit sein, dass die Bewehrung mit der jeweiligen erforderlichen Betondeckung eingebaut und der Beton problemlos eingebracht und verdichtet werden kann.

6.4.2 Lage des Momentennullpunktes in den Pfosten

Bei einem Träger mit mehreren Öffnungen bildet sich im Zustand I das Trag- und Verformungsverhalten eines Vierendeelträgers aus. Der Vierendeelträger entspricht einem strebenlosen Rahmentragwerk.

Unter der Annahme, dass die Momentennullpunkte der Gurte in der Öffnungsmitte liegen, ergibt sich das mehrfach statisch unbestimmte System in Abbildung 6.22 (vgl. [TDF85]). Der prinzipielle Verlauf der Momentenlinien in den Gurten und im Pfosten ist in Abbildung 6.23 dargestellt.

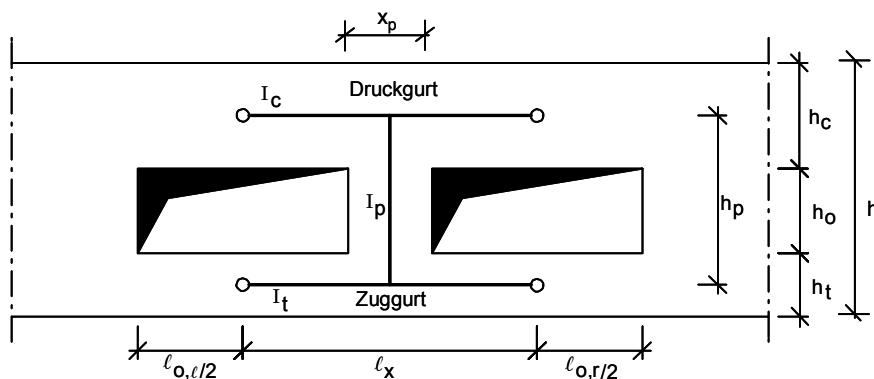


Abbildung 6.22: Vereinfachtes Rahmentragwerk

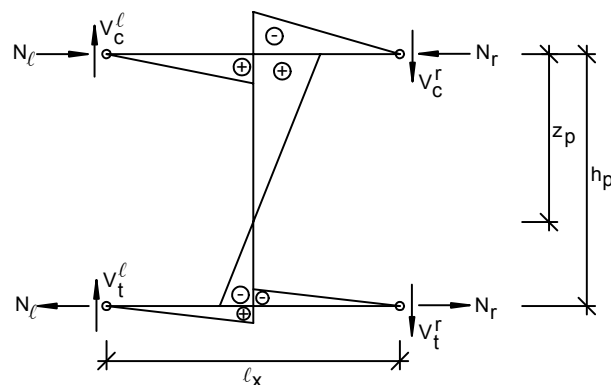


Abbildung 6.23: Momentenverlauf am Rahmentragwerk

Für den Zustand I erhält man durch Auswertung des statisch unbestimmten Systems folgende Gleichung zur Bestimmung der Lage des Momentennullpunktes im Pfosten:

$$\frac{z_p}{h_p} = \frac{6 + \frac{I_p}{I_t} \cdot \frac{\frac{l_{o,r}}{2} + \frac{l_{o,l}}{2} + x_p}{h_p}}{12 + \frac{\frac{l_{o,r}}{2} + \frac{l_{o,l}}{2} + x_p}{h_p} \cdot \left(\frac{I_p}{I_c} + \frac{I_p}{I_t} \right)} \quad (6.41)$$

Mit:

- I_p Trägheitsmoment des Pfostens
- I_t Trägheitsmoment des Zuggurtes
- I_c Trägheitsmoment des Druckgurtes
- $l_{o,r}$ Länge der rechten Öffnung
- $l_{o,l}$ Länge der linken Öffnung
- x_p Pfostenbreite

Für $l_x = \frac{l_{o,r}}{2} + \frac{l_{o,l}}{2} + x_p$ ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{z_p}{h_p} = \frac{6 + \frac{I_p}{I_t} \cdot \frac{l_x}{h_p}}{12 + \frac{l_x}{h_p} \left(\frac{I_p}{I_c} + \frac{I_p}{I_t} \right)} \quad (6.42)$$

Während der Lastgeschichte ändern sich die Steifigkeiten des Zug- und Druckgurtes infolge fortschreitender Rissbildung. Auch die Lage des Momentennullpunktes im Steg verschiebt sich in Abhängigkeit der Lastgeschichte, wie eigene numerische Untersuchungen zeigen (siehe Kapitel 5.3.3.4). Um die Steifigkeitsverluste im Zustand II bei der Ermittlung der Lage des Momentennullpunktes im Pfosten für den Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigen, können die effektiven Steifigkeiten mit Hilfe der Abminderungsbeiwerte nach Gleichung 6.34 und Gleichung 6.36 bestimmt und in Gleichung 6.42 eingesetzt werden.

Zur Überprüfung der entwickelten Gleichung werden in Abbildung 6.24 die FE-Berechnungen dem Bemessungskonzept gegenübergestellt. Die durchgezogene Hilfslinie stellt die völlige Übereinstimmung der Ergebnisse dar. Untersucht werden hierbei Stahlbetonträger mit Öffnungen, deren Lage zur Schwerelinie des Trägers

variiert (siehe Anhang B, Tabelle B.1). Die Verschiebung des Momentennullpunktes im Steg wird sowohl für den Zustand I als auch für den Zustand II kurz vor dem Versagen des Trägers ermittelt. Im Zustand I verschiebt sich der Momentennulldurchgang im Verhältnis der Steifigkeiten der Gurte. Bei einem im Vergleich zum Zuggurt größeren Druckgurt (Träger T43) wandert der Momentennulldurchgang in Richtung des Zuggurtes, dadurch ändern sich auch die Hebelarme für die Sekundärmomente im Steg. Die Beanspruchung aufgrund der Sekundärmomente wird somit im Druckbereich größer. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit werden die Steifigkeiten in den Gurten und im Steg durch die Rissbildung stark reduziert, so dass sich der Momentennulldurchgang im Steg wieder Richtung Schwerelinie des Trägers verschiebt.

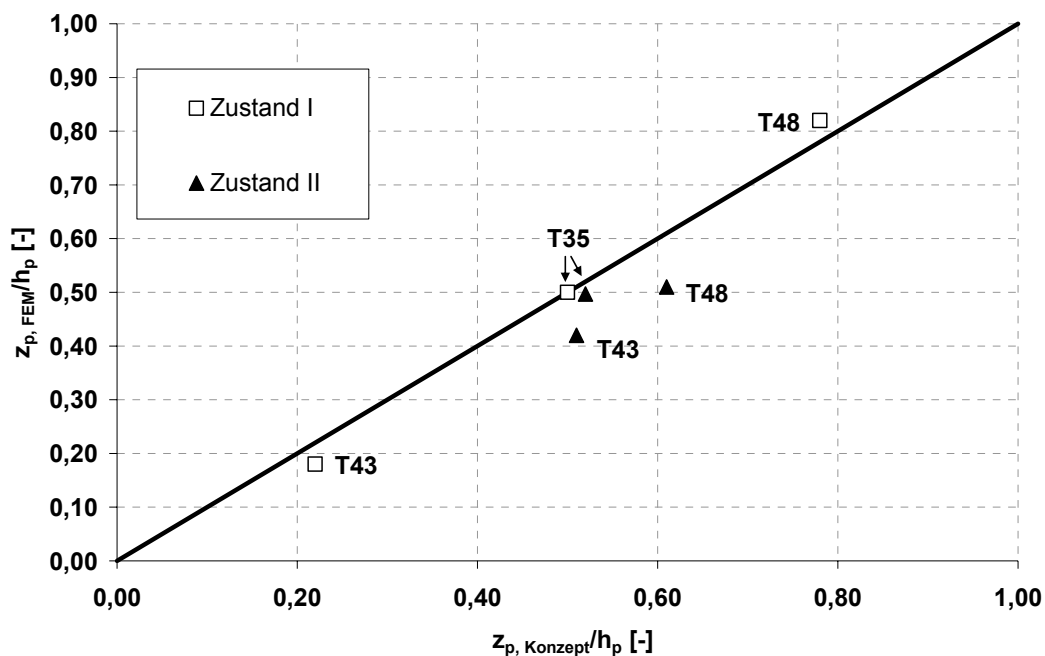


Abbildung 6.24: Lage des Momentennullpunktes im Steg für Zustand I und II

Wie bereits die numerischen Untersuchungen gezeigt haben, ist der Verlauf der Lage des Momentennullpunktes näherungsweise affin zu dem Verlauf der Querkraftverteilung. Wenn die Querkraftverteilung in Abhängigkeit der vorhandenen effektiven Steifigkeit bekannt ist (siehe Kapitel 6.3), kann vereinfachend die Lage des Momentennullpunktes im Pfosten wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{z_p}{h_p} = \frac{V_c}{V_{\text{tot}}} \quad (6.43)$$

6.4.3 Beanspruchung der Pfosten

Bei ausreichendem Abstand zwischen zwei benachbarten Öffnungen beeinflussen sich diese gegenseitig nicht. Zwischen den benachbarten Öffnungen kann sich eine Druckstrebe ausbilden. Die Öffnungen können somit unabhängig voneinander bemessen werden (siehe Kapitel 6.4.1). Bei Verkleinerung des Öffnungsabstandes stellt sich, wie bereits beschrieben, zunehmend das Tragverhalten eines Rahmens ein. Die Momenten- und Querkraftbeanspruchung im Pfosten resultiert aus der horizontalen Kraft H_p (siehe Abbildung 6.25).

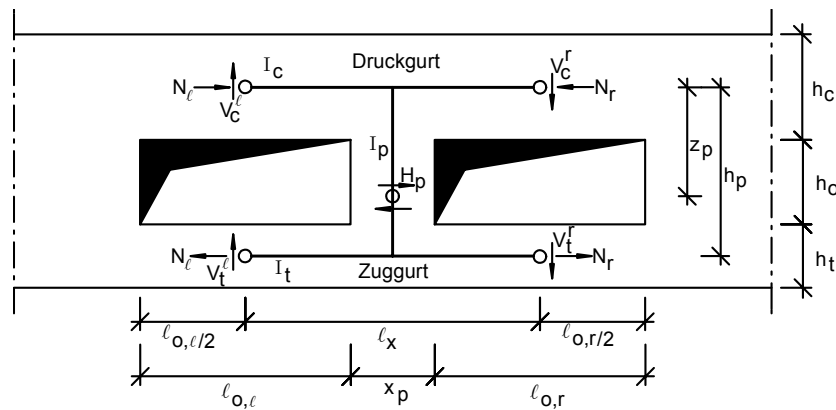


Abbildung 6.25: Horizontalkraft H_p im Pfosten

Durch Bildung des Momentengleichgewichts ergibt sich:

$$V_c^l \cdot l_x - H_p \cdot z_p - N \cdot \frac{l_x}{2} = 0 \quad (6.44)$$

$$V_t^l \cdot l_x - H_p \cdot (h_p - z_p) + N \cdot \frac{l_x}{2} = 0 \quad (6.45)$$

Mit:

H_p Horizontalkraft im Pfosten

N Normalkraft im Pfosten

Es gilt:

$$V_c^l + V_t^l = V \quad (6.46)$$

$$l_x = \frac{l_{o,r}}{2} + \frac{l_{o,l}}{2} + x_p \quad (6.47)$$

Hieraus folgt die Gleichung zur Bestimmung der horizontalen Kraft im Pfosten:

$$H_p = V \cdot \frac{l_x}{h_p} = V \cdot \frac{\frac{l_{o,r}}{2} + \frac{l_{o,l}}{2} + x_p}{h_p} \quad (6.48)$$

Um die Momentenbeanspruchung im Pfosten zu ermitteln, ist die Kenntnis der Lage des Momentennullpunktes im Pfosten notwendig. Die Lage kann entweder mit Hilfe von Gleichung 6.41 oder vereinfachend mit Gleichung 6.42 berechnet werden.

Somit ergibt sich für das Moment am oberen Pfostenende:

$$M_p^c = H \cdot z_p = V \cdot l_x \cdot \frac{6 + \frac{I_p}{I_t} \cdot \frac{l_x}{h_p}}{12 + \frac{l_x}{h_p} \left(\frac{I_p}{I_c} + \frac{I_p}{I_t} \right)} \quad (6.49)$$

Äquivalent zum oberen Rand gilt für das Moment am unteren Rand:

$$M_p^c = H \cdot (h_p - z_p) = V \cdot l_x \cdot \left(1 - \frac{6 + \frac{I_p}{I_t} \cdot \frac{l_x}{h_p}}{12 + \frac{l_x}{h_p} \left(\frac{I_p}{I_c} + \frac{I_p}{I_t} \right)} \right) \quad (6.50)$$

Aus Gleichgewichtsgründen ermittelt sich die Normalkraft im Pfosten aus der Differenz der Gurtquerkräfte in den benachbarten Öffnungen. Im Allgemeinen kann die geringe Normalkraft im Pfosten aufbauend auf den Untersuchungen verschiedener Forscher [WAG87;MATA99;HAU94] vernachlässigt werden.

6.5 Besonderheiten bei der Bemessung von Spannbetonträgern mit Öffnungen

6.5.1 Vorbemerkungen

Für die Untersuchung des Kräfteverlaufs im Bereich der Öffnungen wird die Vorspannung als äußere auf dem Beton wirkende Kraft betrachtet. Der Verankerungsbereich des Spanngliedes und mögliche Umlenkpunkte sind gesondert zu untersuchen (siehe Kapitel 6.7).

6.5.2 Ermittlung der erforderlichen Aufhängebewehrung infolge einer Normalkraft

Innerhalb eines B-Bereichs ist die Normalkraft infolge Vorspannung über die gesamte Balkenhöhe gleichmäßig verteilt. In Abbildung 6.26 wird deutlich, dass durch die Umlenkung der Vorspannkraft eine Zugkraft seitlich der Öffnung entsteht. Diese Zugkraft muss über die Aufhängebewehrung abgedeckt werden. Durch die Umlenkung der Normalkraft entsteht zusätzlich eine Druckkraft D_p , die sich weiter entfernt von den Öffnungsändern befindet. Diese Druckkraft wird von dem Beton übertragen, so dass hier auch ein Nachweis erforderlich ist.

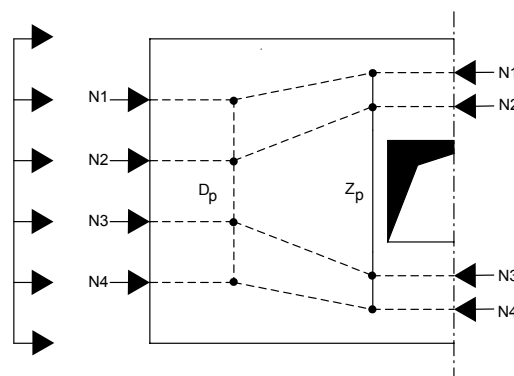


Abbildung 6.26: Fachwerkmodell zur Abtragung der Normalkraft infolge Vorspannung

Die infolge Vorspannung entstandenen Zugspannungen gehen nach Kennedy et al. [KEEL82] im Abstand x_t vom Öffnungsrand auf Null zurück und es entstehen auf einer Länge x_c Druckspannungen (siehe Abbildung 6.27).

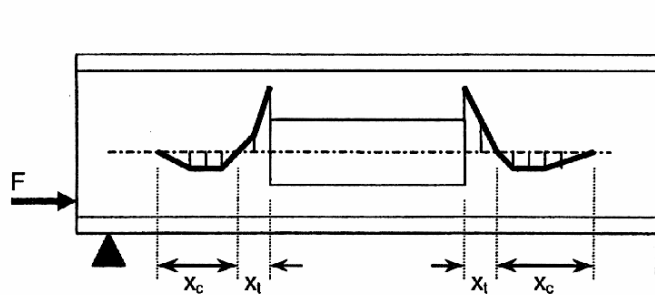


Abbildung 6.27: Spannungsverteilung infolge Vorspannung seitlich der Öffnungen aus [MATA99]

Auch in den eigenen FE-Berechnungen konnte die Ausbildung der Zug- und Druckspannungen in vertikaler Richtung beobachtet werden (siehe Abbildung 6.28).

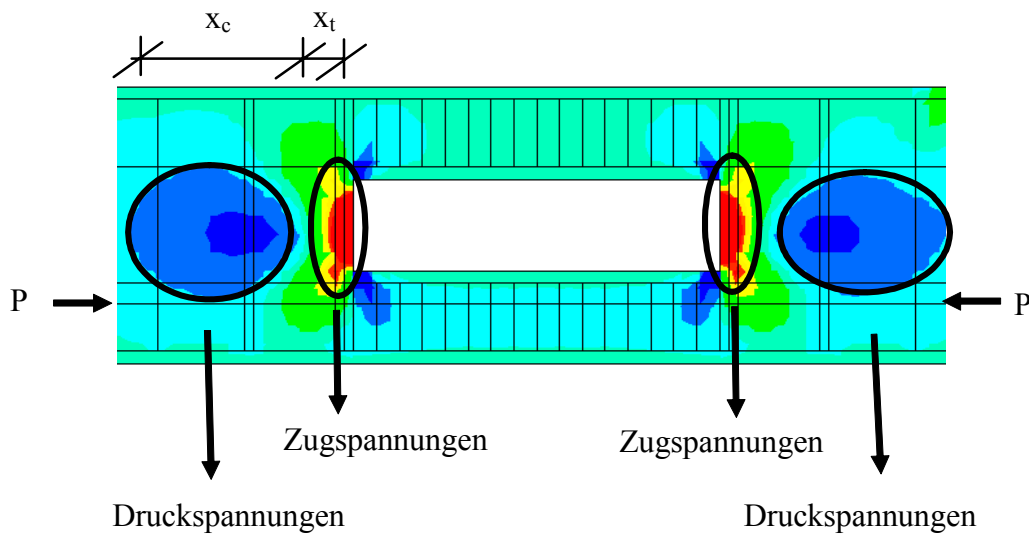


Abbildung 6.28: Zug- und Druckspannungen in vertikaler Richtung seitlich der Öffnung

Die Längen x_t und x_c berechnen sich nach [KEEL82] zu:

$$x_t = 12,7 \frac{h^2}{h_o y_o} \quad [\text{mm}] \quad (6.51)$$

$$x_c = \frac{2 h y_o}{3 h_o} \quad (6.52)$$

Mit

h_o Höhe der Öffnungen

y_o Abstand von Mitte Öffnung zur Unterkante des Trägers

h Trägerhöhe

Die Bestimmung der Zugkraft Z_p erfolgt über Fachwerkmodelle. Das Fachwerkmodell für eine exzentrisch angreifende Normalkraft infolge Vorspannung ist in Abbildung 6.29 dargestellt.

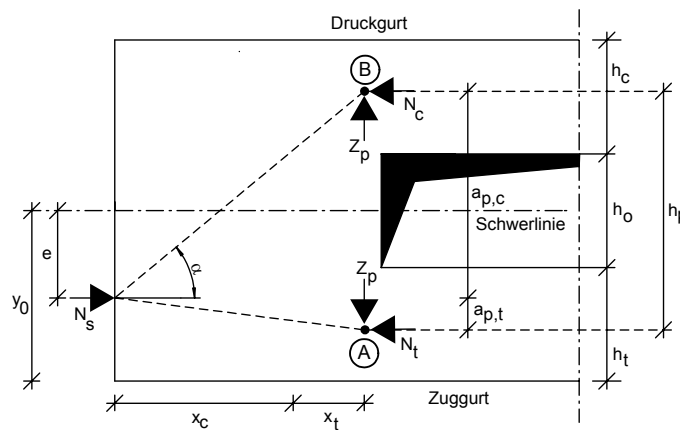


Abbildung 6.29: Fachwerkmodell für eine exzentrisch angreifende Normalkraft

Am Beispiel der exzentrisch angreifenden Normalkraft wird im Folgenden die erforderliche Aufhängebewehrung infolge Vorspannung ermittelt. Um die Normalkraft N_c im Druckgurt zu bestimmen, wird das Momentengleichgewicht um den Punkt A gebildet und nach N_c aufgelöst:

$$N_c = N_s \cdot \frac{a_{p,t}}{h_p} = N_s \cdot \frac{y_o - \frac{h_t}{2} - e}{h_o + \frac{h_t}{2} + \frac{h_c}{2}} \quad (6.53)$$

Mit

$$a_{p,t} = y_o - \frac{h_t}{2} - e \quad (6.54)$$

$$a_{p,c} = h - y_o - \frac{h_c}{2} + e \quad (6.55)$$

$$h_p = h_o + \frac{h_t}{2} + \frac{h_c}{2} \quad (6.56)$$

Über die Gleichgewichtsbeziehung am Knoten B erhält man die Zugkraft Z_p :

$$Z_p = \tan \alpha \cdot N_c \quad (6.57)$$

Mit

$$\tan \alpha = \frac{a_{p,c}}{x_t + x_c} \quad (6.58)$$

Die Zugkraft Z_p berechnet sich daher aus der gegebenen Normalkraft N_s , die im Schwerpunkt angreift, zu:

$$Z_p = \frac{a_{p,c}}{x_t + x_c} \cdot N_c = \frac{a_{p,t} \cdot a_{p,c}}{h_p \cdot (x_t + x_c)} \cdot N_s \quad (6.59)$$

Unter der Annahme, dass die Spannungsverteilung innerhalb der Länge x_t linear verläuft, ergibt sich folgende maximale Zugspannung in vertikaler Richtung:

$$\sigma_{t,\max} = \frac{2 \cdot Z_p}{b \cdot x_t} \quad (6.60)$$

Die erforderliche Aufhängebewehrung infolge Vorspannung ergibt sich zu:

$$A_{s,H,P} = \frac{Z_p}{f_y} \quad (6.61)$$

Zur Beurteilung des Rechenalgorithmus werden die auftretenden Zugspannungen seitlich der Öffnungen aus den Versuchen von Kennedy et al. [KEEL82] mit Hilfe des entwickelten Fachwerkmodells nachgerechnet. Innerhalb der Versuchsserie von Kennedy wurden Rechteckquerschnitte exzentrisch vorgespannt. Hierbei wurden die Vorspannkraft, die vertikale Lage der Öffnung sowie die Öffnungshöhe variiert. Die Ergebnisse zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung (siehe Abbildung 6.30). Bei Träger R3 wird auf der sicheren Seite liegend die Zugspannung seitlich der Öffnung überschätzt.

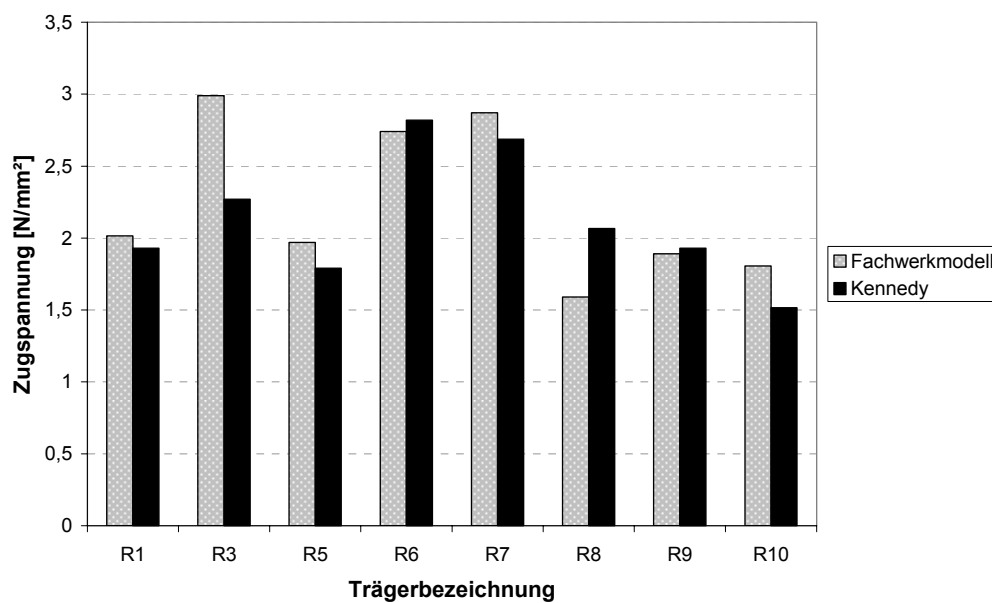


Abbildung 6.30: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen aus [KEEL82]

6.6 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

6.6.1 Berechnung der Durchbiegung

Bei Stahlbetonträgern mit Öffnungen führen die Querschnittsschwächungen zu einer erheblichen Vergrößerung der Durchbiegung. Daher ist es zwingend erforderlich, die Öffnungen bei der Durchbiegungsberechnung zu berücksichtigen. Innerhalb dieser Arbeit wurde ein Vorschlag zur Berechnung entwickelt, mit dem der Zuwachs an Durchbiegung infolge der Öffnungen bestimmt werden kann.

Die numerischen Untersuchungen aus Kapitel 5.8 zeigen, dass die Durchbiegung exponential mit zunehmender Öffnungsgröße ansteigt. D.h. die Durchbiegung eines Trägers mit Öffnungen hängt im Wesentlichen von der Öffnungslänge und –höhe sowie von der Öffnungsanzahl ab, während die Lage der Öffnungen keinen Einfluss auf die Durchbiegung besitzt. Daher werden zunächst exponentielle Funktionen für die FE-Kurven aus Abbildung 5.77 in Abhängigkeit der Öffnungshöhe gesucht. Für diese Kurvenschar wird im nächsten Schritt die zweite Einflussgröße – die Öffnungslänge – analysiert. Die numerischen Untersuchungen ergeben weiterhin, dass sich die Durchbiegung um einen konstanten Faktor in Abhängigkeit der Öffnungsanzahl erhöht. Somit ergibt sich aus den Finite Elemente Berechnungen folgende Gleichung, in der die Vergrößerung der Durchbiegung im Vergleich zur Durchbiegung eines Massivträgers ermittelt werden kann:

$$\frac{v_{\text{Öffnung}}}{v_{\text{Massiv}}} = \left(4,47 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\delta} + 0,5128 \cdot \frac{l_0}{l} \right) \cdot a + 1 \quad (6.62)$$

Mit

a Anzahl der Öffnungen

δ Beiwert

$$\delta = 15 \frac{l_0}{l} + 8,2 \frac{h_0}{h} \quad (6.63)$$

Für die Durchbiegungsberechnung ist die Öffnungsgröße begrenzt. Die maximale Öffnungshöhe ist durch die Bewehrungsführung in den Gurten definiert, so dass sich

eine Vierendeelträgerwirkung einstellen kann. Die maximale Öffnungslänge ist auf 30% der Trägerlänge zu begrenzen, wie Untersuchungen von Prentzas [PRE68] und Ehmann [EHM02] beweisen. Bei Unterschreitung der Grenzöffnungshöhe und -länge nach Ehmann [EHM02] wird der Einfluss der Öffnung auf die Durchbiegung vernachlässigbar klein.

Dieser eigene Ansatz wird zunächst mit den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen verglichen. In Abbildung 6.31 ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

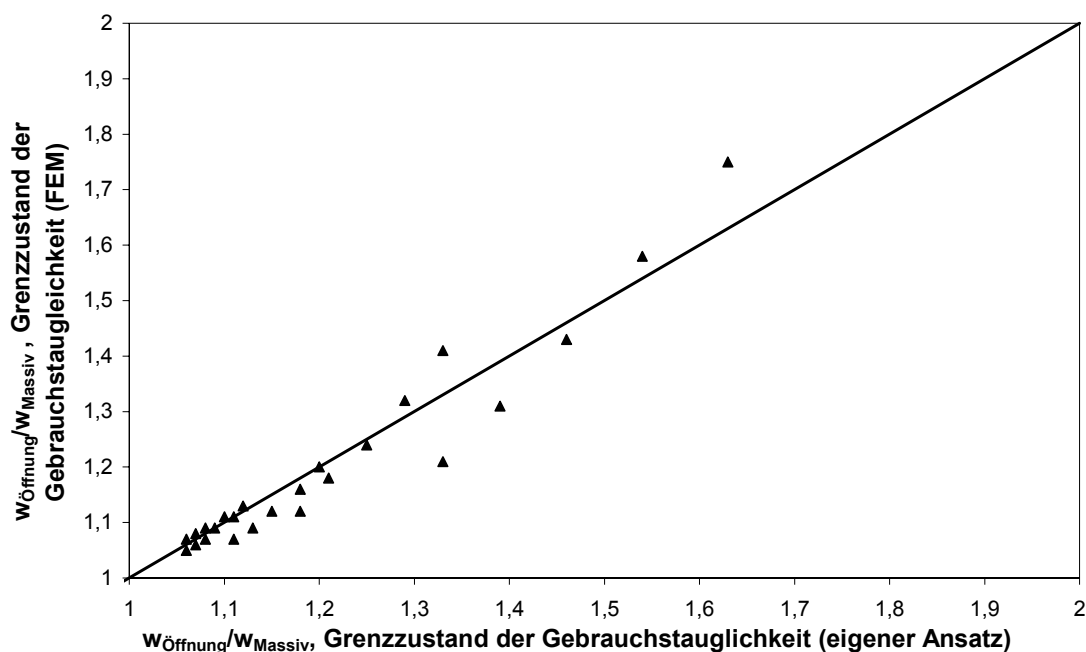


Abbildung 6.31: Gegenüberstellung der berechneten Durchbiegungen mit den Ergebnissen aus den FE-Berechnungen bezogen auf die Durchbiegung des Massivträgers im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die eigene Versuchsserie aus Kapitel 3 kann nicht zur Verifikation der Durchbiegungsberechnung heran gezogen werden, da die Stahlprofile zur Lasteinleitung die Verformung der Versuchsträger beeinflussen. Daher wird die Versuchsserie von Mansur zur Verifikation des eigenen Ansatzes herangezogen. Diese wurde bereits in Kapitel 5.8.3 mit den eigenen numerischen Berechnungen verglichen. Weiterhin werden in Abbildung 6.32 die Konzepte nach Ehmann [EHM02] und nach Mansur [MATA99] zum Vergleich herangezogen. Der eigene Ansatz stimmt sehr gut mit den

Versuchsergebnissen von Mansur und den numerischen Berechnungen überein. Das Konzept nach Ehmann überschätzt die Durchbiegung der beiden ersten Träger, die eine geringere Öffnungslänge aufweisen. Die Durchbiegungen nach dem Konzept von Mansur sind bei sämtlichen Trägern zu gering. Die Eignung des eigenen Ansatzes konnte somit bestätigt werden.

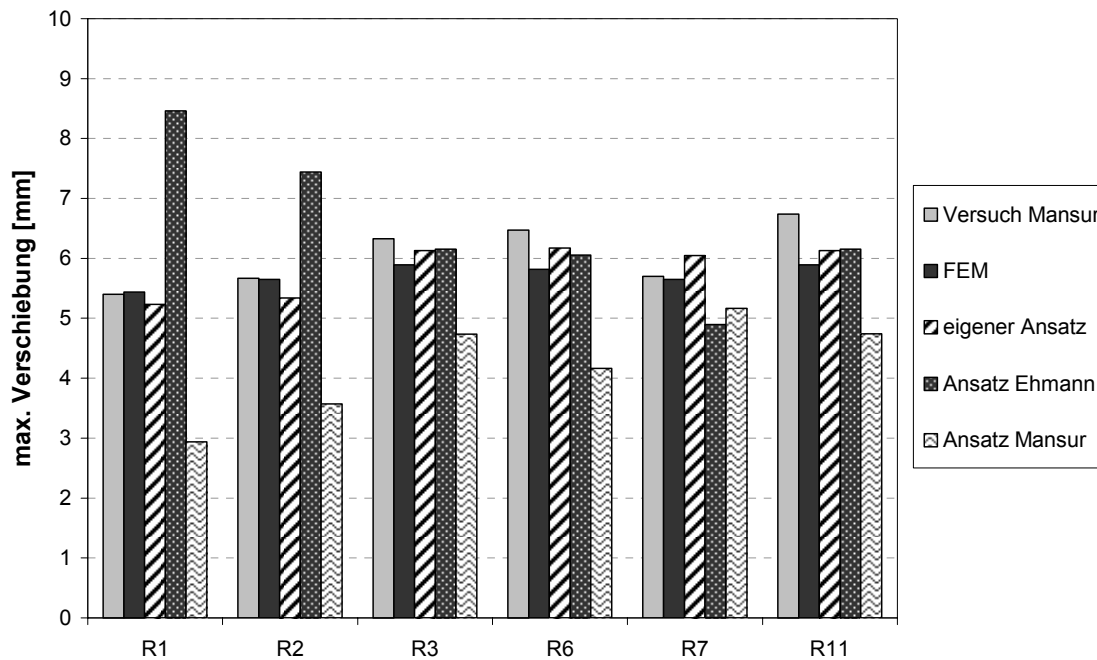


Abbildung 6.32: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse von Mansur mit den Ergebnissen aus den FE-Berechnungen sowie den berechneten Durchbiegungen mit verschiedenen Konzepten

6.6.2 Beschränkung der Rissbreite

Aufgrund der großen Kerbspannungen in den Öffnungsecken ist vor allem in diesen Bereichen die Rissentwicklung sorgfältig zu untersuchen. Zur Reduzierung dieser Spannungsspitzen sind grundsätzlich runde Öffnungen oder Öffnungen mit ausgerundeten Öffnungsecken den rechteckigen Öffnungen vorzuziehen. Wie bereits die Versuchsergebnisse von Tan [TAN82] zeigen, kann mit Hilfe einer Diagonalbewehrung in den Öffnungsecken die Rissbreite wirksam begrenzt werden. Daher ist es erforderlich, einen Teil der Aufhängebewehrung A_{SH1} als Diagonalbewehrung auszuführen. In dem Ansatz nach Ehmann [EHM02] wird die Diagonalbewehrung in Abhängigkeit der Lage der Öffnung bestimmt.

6.7 Bauliche Durchbildung

6.7.1 Lastabtragung bei Trägern mit Öffnungen

In Abbildung 6.33 und Abbildung 6.34 sind die Fachwerkmodelle zur Abtragung des Biegemomentes und der Querkraft aufgetragen. Eine Aufhängebewehrung ist zur Übertragung der Querkraft auf beiden Seiten der Öffnung unbedingt erforderlich. In Abhängigkeit der Vorzeichen der einwirkenden Schnittgrößen ist weiterhin auf einer Seite der Öffnung eine zweite Aufhängebewehrung erforderlich.

Die Kreise in den Abbildungen markieren die Stellen mit der höchsten Zugbeanspruchung in der Längsbewehrung, d.h. an diesen Stellen bilden sich zuerst Fließgelenke.

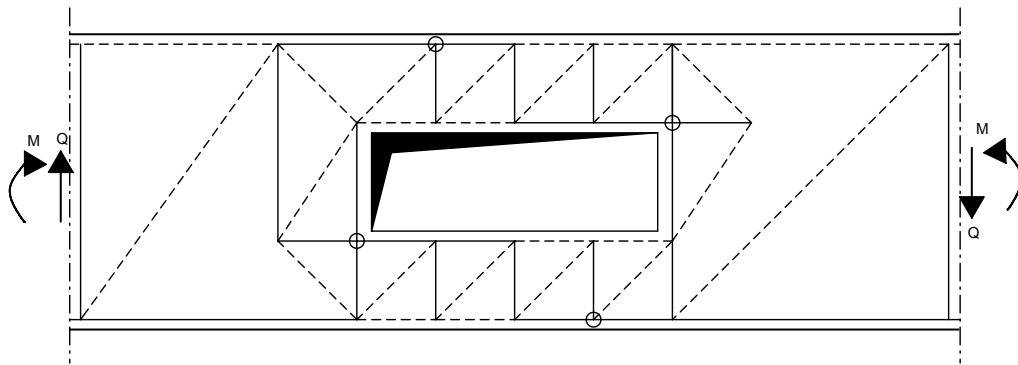


Abbildung 6.33: Fachwerkmodell für eine positive Momenten- und Querkraftbeanspruchung
(Gestrichelte Linie: Druck, durchgezogene Linie: Zug)

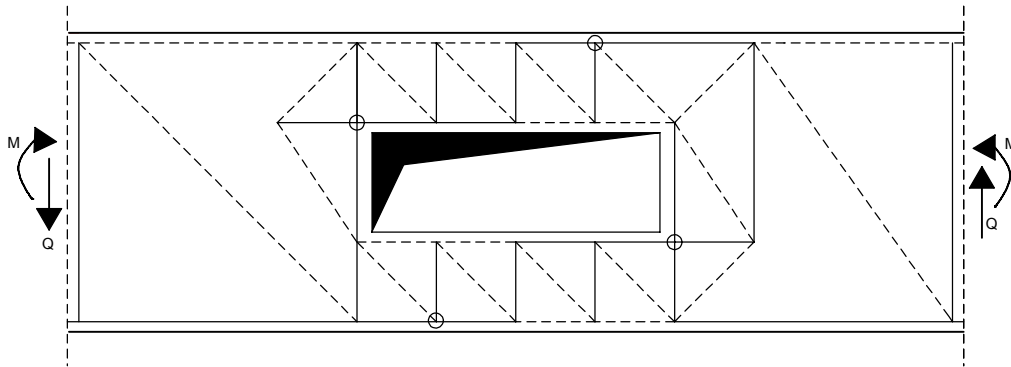


Abbildung 6.34: Fachwerkmodell für eine positive Momenten- und negative Querkraftbeanspruchung
(Gestrichelte Linie: Druck, durchgezogene Linie: Zug)

Die Aufhängebewehrung A_{sH1} ist unter Einhaltung der erforderlichen Betondeckung c_{nom} so nah wie möglich an dem Öffnungsrand zu platzieren. Der Wirkungsbereich von A_{sH1} erstreckt sich nach Schlaich und Schäfer [SCSC98] über den doppelten Bügeldurchmesser. Aus den Fachwerken in Abbildung 6.33 und Abbildung 6.34 wird die Notwendigkeit einer zweiten Bügelbewehrung ersichtlich. Die zweite Aufhängebewehrung A_{sH2} wird im Abstand $0,45 h$ von A_{sH1} angeordnet. Der Wirkungsbereich der zweiten Aufhängebewehrung ergibt sich somit zu $0,9 h$. Die Längsbewehrungsstäbe sind aus statischer Sicht teilweise über den Öffnungsrand bis zur zweiten Aufhängebewehrung hinaus zu führen und dort mit der erforderlichen Verankerungslänge nach DIN 1045-1 zu verankern (siehe Abbildung 6.35).

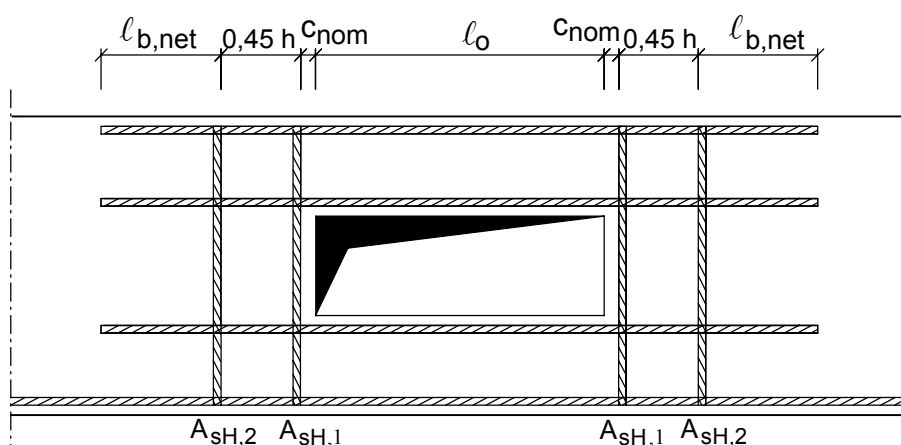


Abbildung 6.35: Verankerung der Längsbewehrungsstäbe

6.7.2 Bestimmung der erforderlichen Aufhängebewehrung

Die gesamte Aufhängebewehrung setzt sich aus der erforderlichen Bewehrung infolge Vorspannung (siehe Kapitel 6.5.2) und der erforderlichen Bewehrung infolge äußerer Lasten zusammen.

In Tabelle 6.3 sind die Angaben verschiedener Bemessungsvorschläge für die erforderlichen Zugkräfte seitlich der Öffnung zur Bemessung der Aufhängebewehrung aufgelistet, um die unterschiedliche Beanspruchung in der Aufhängebewehrung zu verdeutlichen. Das zugehörige statische System ist in Abbildung 6.36 abgebildet.

Tabelle 6.3: Zugkraft zur Bestimmung der Aufhängebewehrung

| Forscher | Zugkraft an der Stelle | | | |
|--------------------|------------------------|------------|------------|------------|
| | A_{SH2L} | A_{SH1L} | A_{SH1R} | A_{SH2R} |
| Ehmann | 1,3 V | 1,6 V | 1,6 V | 1,3 V |
| Leonhardt | - | 0,8 V | 0,8 V | - |
| Eligehausen | - | 0,5 V | 2,0 V | - |
| Schlaich / Schäfer | - | 1,5 V | 2,1 V | 1,0 V |

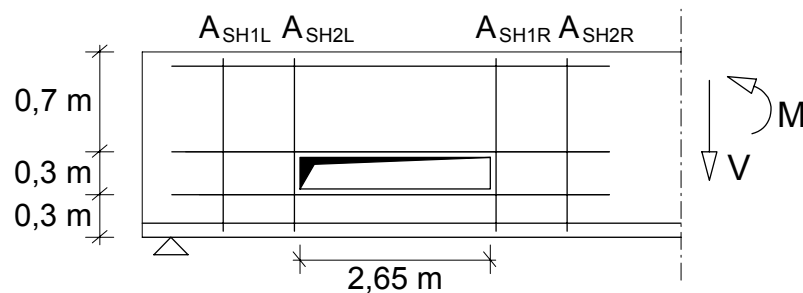


Abbildung 6.36: Statisches System eines Beispielträgers aus [ELGE93]

Die eigenen experimentellen und numerischen Ergebnisse zeigen, dass Konzept nach Ehmann gut geeignet zur Aufnahme der auftretenden Kräfte ist.

Die gesamte Zugkraft für die erforderliche Aufhängebewehrung A_{SH1} ergibt sich somit zu:

$$Z_{AsH1} = Z_V + Z_P \quad (6.64)$$

Mit

Z_V Zugkraft infolge äußere Lasten nach Ehmann [EHM02]

$$Z_V = 1,6 \cdot V_{tot}$$

Z_P Zugkraft infolge einer Normalkraft oder Vorspannung (vgl. Kapitel 6.5.2)

$$Z_P = \frac{a_{p,c}}{x_t + x_c} \cdot N_c = \frac{a_{p,t} \cdot a_{p,c}}{h_p \cdot (x_t + x_c)} \cdot N_s$$

6.7.3 Wahl des Spanngliedverlaufs bei Trägern mit Öffnungen

Nach [MATA99] soll die Umlenkstelle eines Spanngliedes innerhalb von $1/4$ bis $1/3$ der Trägerlänge vom Auflager aus liegen (siehe Abbildung 6.37). Die Umlenkstelle sollte hierbei in der Mitte des Pfostens angeordnet werden.

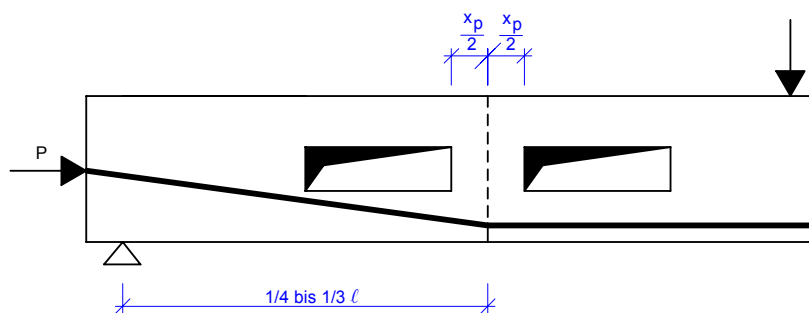


Abbildung 6.37: Günstige Anordnung der Umlenkstelle

Aufgrund der Versuchsergebnisse von Barney et al. [BHC77] wird empfohlen, Öffnungen außerhalb des Verankerungsbereichs zu platzieren, damit der Verbund zwischen Spannglied und Beton nicht beeinträchtigt wird.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden experimentelle und numerische Untersuchungen an Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen vorgestellt. Mittels einer Serie von sechs Großversuchen wurde das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonträgern mit großen, auflagnahen Einzelöffnungen untersucht. Mit Hilfe eines innovativen Versuchsaufbaus wurden die Schnittgrößen Moment und Querkraft unabhängig voneinander erzeugt. Somit konnten erstmalig Stahlbetonträger mit auflagnahen Öffnungen untersucht werden. Weiterhin ist es gelungen, die Querkraftverteilung in Abhängigkeit der Lastgeschichte zu erfassen. Auch die Lage des Momentennullpunktes in den Öffnungsgurten konnte anhand der Gurtverformungen ermittelt werden. Weiterhin wurde die Bildung von Fließgelenken in den Öffnungsgurten erforscht.

Die Versuchsergebnisse wurden mit FE-Berechnungen verifiziert. Um ein wirklichkeitsnahes Verhalten zu simulieren, wurde das nichtlineare Werkstoffverhalten von Beton und Stahlbeton berücksichtigt. Eine zusätzlich aufgebrachte Vorspannung wurde sowohl diskret als auch verschmiert abgebildet. Umfangreiche Parameterstudien dienten zur Variation und Bewertung sämtlicher Einflussfaktoren.

Das Verformungsverhalten von Stahlbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen wurde mit Hilfe der Finite Elemente Methode untersucht. Hierbei wurde ein Ersatzmodell entwickelt, an dem die maßgeblichen Einflussparameter bestimmt werden konnten. Vor allem hatten die Öffnungsgröße und die Anzahl der

Öffnungen wesentlichen Einfluss auf die Durchbiegung, während die Öffnungslage in Längsrichtung die Durchbiegung nicht beeinflusste.

Als Grundlage zur Entwicklung eines Ingenieurmodells für die Bemessung von Trägern mit Öffnungen dienten die Versuchsserie und die nichtlinearen FE-Berechnungen. Entscheidend für die Bemessung der Gurte ist die Bestimmung der Schnittgrößenverteilung. Daher wurde in Anlehnung an [EHM02; SCEH02] ein Bemessungskonzept entwickelt, das eine einfache und zielsichere Bestimmung der Querkraftverteilung in Abhängigkeit der äußeren Belastung erlaubt. Auch eine eventuelle Vorspannkraft kann hier erstmalig berücksichtigt werden. Bei Öffnungsgruppen ist weiterhin der Pfosten zwischen benachbarten Öffnungen zu bemessen. Hierzu wurde ein Vorschlag zur Bestimmung der Beanspruchung im Pfosten entwickelt. Die Lage des Momentennullpunktes im Pfosten konnte wirklichkeitsnah bestimmt werden. Entscheidenden Einfluss auf die Traglast und die Rissbildung besitzt die Ausbildung der Aufhängebewehrung seitlich der Öffnungen. Diese bestimmt sich in Abhängigkeit der äußeren Belastung und einer eventuell vorhandenen Vorspannkraft.

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist die Durchbiegung bei Stahlbetonträgern mit Öffnungsgruppen maßgebend. Daher wurde ein eigener Ansatz zur Bestimmung der Durchbiegung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit entwickelt. Dieser Ansatz berücksichtigt die zuvor ermittelten Einflussfaktoren – Öffnungsgröße und Öffnungsabstand – und gibt das Verhältnis zur Durchbiegung eines Massivträgers im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wieder. Abschließend wurden Hinweise zur baulichen Durchbiegung gegeben.

Die einzelnen Nachweisverfahren innerhalb des entwickelten Bemessungskonzeptes wurden mit Hilfe der eigenen Versuchsserie und/oder Versuchen aus der Literatur sowie mittels der numerischen Untersuchungen verifiziert. Es konnte bestätigt werden, dass sämtliche Einflussfaktoren wirklichkeitsnah erfasst wurden. Somit liegt ein abgesichertes Ingenieurmodell zur Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Einzelöffnungen und Öffnungsgruppen vor.

7.2 Ausblick

Die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Spannbetonträgern mit Öffnungen wurde mit nichtlinearen FE-Berechnungen durchgeführt. Zur Bestätigung der Ergebnisse ist eine Versuchsserie an Spannbetonträgern mit Öffnungen durchzuführen. Der verwendete Versuchsaufbau kann durch eine äußere Drucknormalkraft erweitert werden. Die durchgeführte Versuchsserie ist mit Versuchen zur gezielten Untersuchung des Verformungsverhaltens von Trägern mit Öffnungen zu ergänzen.

Des Weiteren sind die Stützbereiche von Durchlaufträgern zu untersuchen. Hierbei ist die Querkraftverteilung für negative Momentenbeanspruchungen mit Versuchen und nichtlinearen Finite Elemente Berechnungen zu bestimmen.

Als zukünftiger Forschungsschwerpunkt könnte das Tragverhalten von bestehenden Stahlbetonträgern untersucht werden, in denen nachträglich Öffnungen eingefügt werden müssen. Durch Nutzungsänderungen von Gebäuden wird es teilweise erforderlich, Leitungen für zusätzliche Haustechnik durch Unterzüge hindurchzuführen. Bei der Herstellung der Unterzüge wurde keine zusätzliche Bewehrung für Öffnungen vorgesehen. In den meisten Fällen ist somit lediglich eine Längsbewehrung in der untersten Lage vorhanden. Die Mechanismen der Kräfteübertragung ändern sich somit grundlegend, wie erste Tastversuche von Prentzas [PRE68] und Mansur et al. [MTW99] bestätigen. Eine umfassende Versuchsserie ist erforderlich, um sämtliche Einflussfaktoren zu erfassen. Das selbst entwickelte Bemessungskonzept sowie Konzepte von anderen Forschern sind für eine konzentrierte Bewehrungsführung im Bereich der Öffnung ausgelegt und daher auf nachträglich eingefügte Öffnungen in bereits bestehende Träger zunächst nicht anwendbar. Daher ist die Übertragbarkeit des Bemessungskonzepts zu überprüfen.

Literaturverzeichnis

- [ABKE95] Abdalla, H.; Kennedy, J. B.: Design of Prestressed Concrete Beams with openings. Journal of Structural Engineering, May 1996, S. 890-898.
- [ASTM70] ASTM Standards in Building Codes, Specifications Methods of Test Definitions, 8. Auflage, Philadelphia, 1970.
- [BAOH83] Bazant, Z. P.; Oh, B. H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete. Materials and Structures, No. 16, 1983.
- [BAT86] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokio 1986.
- [BGS00] Benning, W.; Görtz, S.; Schwermann, R.: Photogrammetrie-gestützte Deformationsanalyse an Stahl- und Spannbetonbauteilen. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN, Heft 10, 2000.
- [BESC97] Benning, W.; Schwermann, R.: PHIDIAS-MS – Eine digitale Photogrammetrieapplikation unter MicroStation für Nahbereichsverwendungen. Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, Heft 1, 1997.
- [BHC77] Barney, G. B.; Hanson, J. M.; Corley, W. G.; Parmelee, R. A.: Behaviour and Design of Prestressed Concrete Beams with Large Web Openings. PCI-Journal, Vol. 22, Nov/Dec 1977, S. 32-61.
- [BOR86] De Borst, R.: Non-linear analysis of frictional materials, Dissertation, Delft, 1986.

- [BOR87] De Borst, R.: Stability and Uniqueness in Numerical Modelling of Concrete Structures, Computational Mechanics of Concrete Structures – Advances and Applications, IABSE Colloquium, Delft 1987.
- [BORO91] De Borst, R.; Roddeman, D. G.: Computational Mechanics: Recent Developements in DIANA. Vol. 36, No. 2, HERON, Delft 1991.
- [CECE96] Cervenka, V.; Cervenka, J.: Computer Simulation as a Design Tool for Concrete Structures. ICCE, Computer Applications, Research and Practise, Bahrain, 1996.
- [CHR86] Cornelissen, H. A. W.; Hordijk, D. A.; Reinhardt, H. W.: Experimental Determination of Crack Softening Characteristics of Normalweight and Lightweight Concrete. Heron Vol. 31, No. 2, Delft 1986.
- [COMI91] Collins, M. P.; Mitchell, D.: Prestressed Concrete Structures. Prentice Hall Inc., New Jersey, 1991.
- [DIA03] DIANA User's Manual. Release 8.1, second Edition, TNO, 2003.
- [DISA84] Dinakaran, V., Sastry, M. K. L. N.: Behaviour of Post-tensioned Prestressed Concrete T-beams with Large Web Openings. Indian Concrete Journal, S. 34-38, Feb 1984.
- [DOE74] Dörr, K.: Ein Beitrag zur Berechnung von Stahlbetonscheiben unter besonderer Berücksichtigung des Verbundverhaltens. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 238, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1974.
- [DUD91] Duda, H.: Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 419, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1991.
- [EHM02] Ehmann, S.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonträgern mit großen Öffnungen. Fortschritt-Berichte VDI, Nr. 182, 2002.

- [ENS01] Ehmann, S.; Neff, C.; Schnellenbach-Held, M.: Reinforced Concrete Beams with Large Openings - Theoretical Results and Test Setup. Darmstadt Concrete, V16, Eigenverlag, Darmstadt 2001.
- [ELGE93] Eligehausen, R.; Gerster, R.: Das Bewehren von Stahlbetonbauteilen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 399, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1993.
- [EMP95] Empelmann, M.: Zum nichtlinearen Trag- und Verformungsverhalten von Stabtragwerken aus Konstruktionsbeton unter besonderer Berücksichtigung von Betriebsbeanspruchungen. Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 1995.
- [FEBO93] Feenstra, P. H.; de Borst, R.: Aspects of Robust Computational Modeling for Plain and Reinforced Concrete. Vol. 38, No. 4, HERON, Delft 1993.
- [FIS96] Fischer, J.: Versagensmodell für schubslanke Balken. Dissertation, Institut für Massivbau, TU Darmstadt, 1996.
- [GKQ79] Grasser, E.; Kordina, K.; Quast, U.: Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen nach DIN 1045, Ausgabe 12/78. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 220, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1979.
- [GÖR04] Görtz, S.: Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen aus Normal- und Hochleistungsbeton. Dissertation, Institut für Massivbau, RWTH Aachen, Heft 18, 2004.
- [GRKL01] Gruenberg, J., Klaus, M.: Diagramme für die gezielte Querschnittsbemessung bei Interaktion von Längskraft und Biegemoment nach DIN 1045-1. Beton- und Stahlbetonbau 96, Heft 8, S. 539-547, 2001.

- [GRTH91] Grasser, E.; Thielen, G.: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 240, 3. überarbeitete Auflage, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1991.
- [HAN69] Hanson, J. M.: Square Openings in Webs of Continuous Joists. Informal Report, Portland Cement Association, Chicago 1969.
- [HAR77] Hartl, G.: Die Arbeitslinie eingebetteter Stähle bei Erst- und Kurzzeitbelastung. Dissertation, Universität Innsbruck, 1977.
- [HAU94] Hauri, H.: Der durchlöcherter Träger. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 14, März 1994.
- [HEGÖ02] Hegger, J.; Görtz, S.; Schwermann R.: Analyse des Schubrissverhaltens unter Einsatz der Photogrammetrie. Bautechnik 79, Heft 3, 2002.
- [HIL96] Hilsdorf, H.K.: Beton, Betonkalender 1996, Teil 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1996.
- [HOR92] Hordijk, D. A.: Tensile and Fatigue Behaviour of Concrete, Experiments, Modelling and Analyses, Heron, Vol. 37, No. 1, Delft 1992.
- [HOSC96] Hottmann, H. U.; Schäfer, K.: Bemessen von Stahlbetonbalken und –wandscheiben mit Öffnungen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 459, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1996.
- [IRL74] Irle, A.: Zum vereinfachten Stabilitätsnachweis ebener Stahlbetonrahmen. Dissertation, TH Darmstadt, 1974.
- [JAN72] Janko, B.: Zum Trag- und Verformungsverhalten ebener Stockwerkrahmen. Dissertation, TH Braunschweig, 1972.
- [JEN89] Jennewein, M.: Zum Bemessen des Stahlbetons mit Stabwerkmodellen, Dissertation, Institut für Tragwerksentwurf und –konstruktion, Universität Stuttgart, 1989.

- [JESP01] Jendele, L.; Eervanka, J.; Saouma, V.; Pukl, R.: On the Choice between Discrete or Smeared Approach in Practical Structural FE Analyses of Concrete Structures. Fourth International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation in Glasgow, 2001.
- [KEI95] Keil, S.: Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen. Cuneus, Zwingenberg an der Bergstraße, 1995.
- [KEAB92] Kennedy, J. B., Abdalla, H.: Static Response of Prestressed Girders with Openings. Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 2, Feb 1992, S. 488-505.
- [KEEL82] Kennedy, J. B., El-Laithy, A. M.: Cracking at Openings in Prestressed Beams at Transfer. Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. 6, June 1982, S. 1250-1265.
- [KMH94] Krätzig, W.; Meskouris, K.; Hanskötter, U.: Nichtlineare Berechnung von Stahlbeton-Rahmentragwerken nach dem Fließgelenkverfahren. Bautechnik 71, Heft 12, 1994, S. 767-775.
- [KUP73] Kupfer, H.: Das Verhalten von Beton unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 229, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1973.
- [LEE89] Lee, Y. F.: Strength and Stiffness of Continous Reinforced Concrete Beams with Openings. Master Thesis, National University of Singapore, 1989.
- [LEO77a] Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau – Grundlagen zum Bewehren im Stahlbetonbau. Dritter Teil, Springer Verlag, Berlin 1977.
- [LEO77b] Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau – Nachweis der Gebrauchsfähigkeit. Vierter Teil, Springer Verlag, Berlin 1977.

- [LIU96] Liu, H.: Nichtlineare bruchmechanische Untersuchungen an Beton und Stahlbeton. Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, Universität Essen, 1996.
- [LOR62] Lorentsen, M.: Holes in Reinforced Concrete Girders. Informal Report, Portland Cement Association, Chicago 1962.
- [MAN88] Mansur, M. A.: Ultimate Strength Design of Beams with Large Openings. International Journal of Structures, Vol. 8, No. 2, 12/1988, S. 107-125.
- [MAN92] Mansur, M. A. et al.: Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings. ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 4, 07-08/1989, S. 391-397.
- [MATA99] Mansur, M. A.; Tan, K. H.: Concrete Beams with Openings, Verlag CRC Press, New York 1999.
- [MTW99] Mansur, M. A.; Tan, K. H.; Wei, W.: Effects of Creating an Opening in Existing Beams. ACI Structural Journal, Vol. 96, No.6, 11-12/1999, S. 899-905.
- [MC 90] CEB-FIP Model-Code 1990: Design Code. Comité Euro-International du Béton, Lausanne 1993.
- [MEKO95] Mehlhorn, G.; Kollegger, J.: Anwendung der Finite Element Methode im Stahlbetonbau. Der Ingenieurbau – Rechnerorientierte Baumechanik, Ernst & Sohn, 1995
- [MHL93] Mansur, M. A.; Huang, L. M.; Lee, S. L.: Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings. ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 4, 1992, S. 391-397.
- [MIE87] Van Mier, J. G. M.: Examples of Non-linear Analysis of Reinforced Concrete Structures with DIANA. Vol. 32, No. 3, HERON, Delft 1987.

- [NAS67] Nasser, K. W. et al.: Behaviour and Design of Large Openings in Reinforced Concrete Beams. ACI Journal, 01/1967, S. 25-33.
- [NEF05] Neff, C.: Neues Bemessungskonzept für Stahlbeton- und Spannbetonträger mit Öffnungen. 45. Forschungskolloquium des DAfStb, Wien, 2005.
- [NESC02] Neff, C., Schnellenbach-Held, M.: Experimental Investigations of Reinforced Concrete Beams with Large Openings. 4th Ph.D. Symposium, München, 2002.
- [NESC03] Neff, C., Schnellenbach-Held, M.: Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Large Openings –Test Results-. Darmstadt Concrete, V18, Eigenverlag, Darmstadt, 2003.
- [NPS00] Neff, C.; Pfeffer, K.; Schnellenbach-Held, M.: Simulation of the Real Behaviour of Concrete on Basis of Small Structural Parts with DIANA. Darmstadt Concrete, V15, Eigenverlag, Darmstadt, 2000.
- [NSD02] Neff, C., Schnellenbach-Held, M., Daus, S.: RC Beams with a Large Rectangular Opening -Experimental Investigations-. Darmstadt Concrete, V17, Eigenverlag, 2002.
- [NOA78] Noakowski, P.: Die Bewehrung von Stahlbetonscheiben bei Zwangbeanspruchung infolge Temperatur. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 296, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1978.
- [PAR98] Parche, I.: Praxisgerechte Erfassung der Vorspannung in nichtlinearen FE-Systemanalysen. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Nr. 98-4, 1998.
- [PFE04] Pfeiffer, U.: Die nichtlineare Berechnung ebener Rahmen aus Stahl- oder Spannbeton mit Berücksichtigung der durch das Aufreißen bedingte Achsendehnung. Cuvillier Verlag Göttingen, 2004.

- [PRE68] Prentzas, E. G.: Behaviour and Reinforcement of Concrete Beams with Large Rectangular Apertures. PhD Thesis, University of Sheffield, 09/1968.
- [RAWA67] Ragan, H.; Warwaruk, J.: Tee Members with Large Openings. PCI-Journal, August 1967, Vol. 12, S. 52-65.
- [REI94] Reit, H.-G.: Untersuchungen zum Interaktionsverhalten von Stahlbetonbalken unter Biegemomenten-, Querkraft- und Normalkraftbeanspruchung. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1994.
- [RNKB85] Rots, J. G.; Nauta, P.; Kusters, G. M. A.; Blaauwendraad, J.: Smeared crack approach and fracture localisation in concrete. Vol. 30, No. 1, HERON, Delft 1985.
- [ROT88] Rots, J. G.: Computational Modeling of Concrete Fracture. Dissertation, TH Delft, 1988.
- [SAHA79] Salam, S. A.; Harrop, J.: Prestressed Concrete Beams with Transverse Circular Holes. Journal of the Structural Division, March 1979, S. 635-652.
- [SCEH02] Schnellenbach-Held, M.; Ehmann, S.: Stahlbetonträger mit großen Öffnungen – Ein ganzheitliches Bemessungskonzept. Beton- und Stahlbetonbau 97, Heft 3, 2002.
- [SEN02] Schnellenbach-Held, M., Ehmann, S., Neff, C.: Some Aspects on the Behaviour and Design of Reinforced Concrete Beams with Large Openings -Theoretical Results and Test Setup-. Concrete Structures in the 21st Century, fib Congress, Osaka, 2002.
- [SCSC98] Schlaich, J., Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. Betonkalender 1998, Teil II, Verlag Ernst und Sohn, Berlin 1998.




- [SCWR86] Schweizerhof, K. H.; Wriggers, P.: Consistent Linearization for Path Following Methods in Nonlinear FE Analysis Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.59, S. 261-279, 1986.
- [SOCO74] Somes, N. F., Corley, W. G.: Circular Openings in Webs of Continuous Beams. Shear in Reinforced Concrete, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 1974, S. 359-398.
- [TAN82] Tan, K. H.: Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams with Rectangular Openings under Bending and Shear. Master Thesis, National University of Singapore, 1982.
- [TDF85] Twelmeier, H.; Dallmann, R.; Fischer, T.; Götsche, J.: Einfluss von großen Stegaussparungen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonträgern. Bericht des Instituts für Statik, TU Braunschweig, 1985.
- [TMH96] Tan, K. H.; Mansur, M. A.; Huang, L. M.: Reinforced Concrete T-Beams with Large Web Openings in Positive and Negative Moment Regions, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 3, 1996, S. 277-289.
- [TUE97] Tue, N.: Überlegung zur Anwendung der Werkstoffgesetze bei der Bemessung der Stahlbeton- und Spannbetontragwerke. Fachbereich Bauingenieurwesen, TU Darmstadt, 1997.
- [VECO86] Vecchio, F. J.; Collins, M. P.: The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Journal 83, 1986, S. 219-231.
- [WAG86] Wagner, K.: Einflüsse auf das Querkrafttragverhalten von Stahlbetonträgern mit Stegöffnungen. Bauplanung – Bautechnik, Heft 1, 1986.
- [WAG87] Wagner, K.: Querkrafttragverhalten von Stahlbetontragwerken mit Stegöffnungen. Dissertation, TH Leipzig, 1987.

- [WAR74] Warwaruk, J.: Behavior of Prestressed Concrete T-Beams with Large Rectangular Web Openings. Shear in Reinforced Concrete, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 1974, S. 399-423.
- [WOM93] Wommelsdorff, O.: Stahlbetonbau. Teil 2, 6. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf 2003.

Anhang A

Stand der Forschung

Tabelle A.1: Übersicht über durchgeführte Versuche an **Stahlbetonbalken** mit Öffnungsgruppen




| Forscher | Versuchsanzahl | Anzahl der Öffnungen pro Träger mit folgenden Geometrien: | | | statisch bestimmt ? | Querschnitt | | Öffnungshöhe / Trägerhöhe [-] | Lage bzw. M/V [m] | Stegbreite zwischen zwei Öffnungen [cm] | variierte Parameter | Versagensart | Bemerkungen und versuchstechnisch verifizierte Erkenntnisse |
|---------------------|----------------|---|---|---|---------------------|-------------|---------------|-------------------------------|-------------------|---|---|--|---|
| | |  |  |  | | Rechteck | Plattenbalken | | | | | | |
| Somes et al. (1974) | 3 | 3* | | | X | | X | 0,63 | 0,66 | 30,5 | Abstand der Öffnungen. | Schubversagen der Stege. Versagenslast wie bei Trägern ohne Öffnungen. | Leichtbetonträger mit negativer Momentenbeanspruchung. Durchbiegung ist abhängig von den Öffnungsabständen. |
| | | | | | | | | | 0,97 | 15,2 | | | |
| | | | | | | | | | 1,12 | 7,6 | | | |
| Twelmeier (1985) | 3 | 3* | 3* | | X | X | | 0,46 | 0,8 | 15 | Abstand und Geometrie der Öffnungen; Bewehrung. | 1. Balken: Ausknicken der oberen Längsbewehrung in der Druckzone. 2. Balken: Biegedruckversagen des Druckgurttes. 3. Balken: Globales Biegezugversagen. | Hohe Querkraftbeanspruchung des Zuggurttes. Geringe Querkraftbeanspruchung des Druckgurttes. Rissbildung kaum Einfluss auf Querkraftverteilung. |
| | | | | | | | | | 0,65 | 30 | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Wagner (1987) | 53 | 3* | | | X | X | | 0,36 bis 0,61 | 0,05 | 10,5 bis 15 | Lage, Geometrie, Größe und gegenseitiger Abstand der Öffnungen. | Auflagermaße Öffnungsgruppen mit geringen Abständen -> Druckstrebenversagen im Steg. Bei Vergrößerung der Abstände -> Versagen des Druckgurttes. Auflagerferne Öffnungsgruppen -> Biegeversagen. | Tragfähigkeit und Gebrauchszustand sind abhängig von der Anordnung und der Geometrie der Öffnungen. |
| | | | | | | | | | 0,10 | 7 bis 20 | | | |
| | | | | | | | | | k. A. | 3 bis 18 | | | |
| Tan, Mansur (1992) | 1 | | | 2* | X | | X | 0,4 | 0,4 | 20 | - | Schubversagen des Steges. | Negative Momentenbeanspruchung. |

* Öffnungen je Trägerseite

Tabelle A.2: Übersicht über Bemessungskonzepte für **Stahlbetonbalken** mit Öffnungsgruppen

| Forscher | Bemessungskonzept und Hinweise zur Bemessung | Momenten-Nullpunkt in den Stegen | Ausbildung der Stege | Durchbiegung | Bemerkungen |
|---------------------|--|--|---|---|---|
| Somes et al. (1974) | <ul style="list-style-type: none"> - Öffnungen dürfen nicht in den angesetzten Spannungsbereich in der Druckzone reichen. - Ober- und Untergurt und die Stege können zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit als eine Einheit betrachtet werden. | k. A. | Stegbreite sollte größer als 4 in. (10,2 cm) oder ein Viertel der Steghöhe sein, um ein problemloses Einbringen des Betons zu gewährleisten. | Durchbiegung der Versuchsträger um bis zu 64% größer im Vergleich zu Massivträgern. | <ul style="list-style-type: none"> - Nur für Bereiche mit negativer Momentenbeanspruchung gültig. - Verwendung von Leichtbeton. |
| Twelmeier (1985) | <ul style="list-style-type: none"> - Bemessung von quadratischen Öffnungen über Rahmentragwerk. - Bemessung von kreisrunden Öffnungen über Fachwerkmodell. | k. A. | k. A. | k. A. | - |
| Wagner (1987) | <ul style="list-style-type: none"> - Vierendeeltragwirkung. - In den D-Bereichen Stabwerkmodell verwenden. - Bei kreisrunden Öffnungen liegt der Momenten-Nullpunkt mittig über und unter der Öffnung. | <ul style="list-style-type: none"> - Rechteckige Öffnungen: Nullpunkt in der Ebene des unteren Öffnungsrandes. - Kreisrunde Öffnungen: $h_{\text{Untergurt}} + 0,15 l_0$ (l_0 = Öffnungslänge) | Keine gegenseitige Beeinflussung zweier Öffnungen bei einem Abstand $u > 2,5 l_0$ (l_0 = Öffnungslänge). Bei kleineren Abständen sind die Stege wie Pfosten eines Vierendeelträgers zu bemessen. | Durchbiegung über abschnittsweise Integration unter Berücksichtigung verringerter Biegesteifigkeiten der Öffnungsbereiche oder über Schlankheit des Trägerfeldes. | - |
| Tan, Mansur (1992) | - Berechnung der Schnittgrößen in den Stegen. Stege werden als kurze, vorgespannte Stützen bemessen. | Vereinfachte Annahme: Nullpunkt in der Mitte der Stege. | Stegbreite sollte mindestens 3/8 der Steghöhe betragen, um ein Versagen der Gurte zu verhindern. | Durchbiegungen der Gurte werden mit der Anzahl der Öffnungen multipliziert und auf die Durchbiegung des ungeschwächten Trägers aus äußeren Lasten addiert. | Versuch mit negativer Momentenbeanspruchung. Ergebnisse werden auf Träger mit positiver Momentenbeanspruchung übertragen. |

Tabelle A.3: Übersicht über durchgeführte Versuche an **Spannbetonbalken** mit Öffnungen

| Forscher | Ver- suchs- anzahl | Anzahl der Öffnungen pro Träger mit folgenden Geometrien: | statisch bestimmt ? | Querschnitt | | Öffnungs- höhe / Träger- höhe [-] | Lage M/V [m] | Stegbreite zwischen zwei Öffnungen [cm] | variierte Parameter | Versagensart | Bemerkungen und versuchstechnisch verifizierte Erkenntnisse |
|---|--------------------------|---|---------------------------|-------------|---------------|---|---------------------|---|---|--|--|
| | |    | ja | nein | Recht- eck | Platten- balken | | | | | |
| Spannbetonbalken mit einer Einzelöffnung | | | | | | | | | | | |
| Dinakaran Sastry (1984) | 9 | 1* | X | | | X | 0,34 | 1,02 | Größe, Lage der Öffnung; Bewehrung | Betondruckver- sagen im Flansch. | Fast gleiche Traglast und Durchbiegung wie bei Massivträgern. |
| | | | | | | | | ∞ | | | |
| Kennedy, Abdalla (1992) | 8 | 1 | | | | X | 0,31 und 0,38 | 0,63 bis 0,73 | Lage, Größe der Öffnung; Bewehrung | Schubversagen. | Öffnungsgröße hat größeren Einfluss auf Traglast und Verformung als Öffnungslage. |
| | 4 | 1 | X | | | | | - | | | |
| Spannbetonbalken mit Öffnungsgruppen | | | | | | | | | | | |
| Wanwaruk (1974) | 11 | 8 | X | | | X | 0,4 | k. A. | Lasteinlei- tungsstelle; Längs- und Bügelbe- wehrung | Abscheren der Bal- ken im Öffnungs- bereich und dem angrenzenden Stegbereich ohne Vorankündigung. | Kleinere Versagenslasten bei auflagernahen Öffnungen. |
| Bamey, Hanson et al. (1977) | 18 | 2 oder 4 | X | | X | | 0,38 | 1,83 bis 4,58 | Lage, Größe der Öffnung; Bewehrung | Schlupf oder Bruch der Spannglieder. Bei einem Träger Schubbruch. | Öffnungen müssen außerhalb der Einleitungslänge der Spannbettstützen liegen. |
| Salam et al. (1979) | 15 | 8 bis 9 | X | | X | | 0,4 und 0,61 | \geq 0,15 | Art der Be- wehrung um die Öffnung; Größe der Öffnungen | Zugversagen und Betondruckver- sagen über den Öffnungen. | Vertikale Bügel seitlich der Öffnungen und Verbügelung der Gurte steigern die Traglast. |
| Hauri (1994) | 1 | 13 | X | | | Doppel-T-Träger | 0,48 | k. A. | - | Versagen der Stege durch Bildung von plastischen Gelenken in den Stegen. | Träger verhielten sich wie zwei voneinander getrennte Gurtstäbe. Erhöhte Durchbiegung. |

* Öffnungen je Trägerseite

Tabelle A.4: Übersicht über Bemessungskonzepte für **Spannbetonbalken** mit Öffnungen

| Forscher | Bemessungskonzept und Hinweise zur Bemessung | Querkraftverteilung auf die Gurte | M.-Nullpunkt in den Gurten | Ausbildung der Stege | Durchbiegung |
|---|--|---|--|---|---|
| Spannbetonbalken mit einer Einzelöffnung | | | | | |
| Dinakaran (1984) | Traglast ist annähernd gleich wie bei einem Massivträger. | Verteilung über Flächenverhältnis des Ober- und Untergurtes. | k. A. | k. A. | Annähernd gleich wie beim Massivträger. |
| Kennedy, Abdalla (1992) | Konzept zur Ermittlung der Querkräfte und Momente in den Gurten. | Verteilung über Verhältnis der Wurzeln aus dem Produkt von Fläche und Flächenträgheitsmoment der Gurte. Nach Rissbildung übernimmt der Druckgurt die weitere Querkraft. | k. A. | k. A. | Annähernd gleich wie beim Massivträger. |
| Spannbetonbalken mit Öffnungsgruppen | | | | | |
| Barney | Konzept zur Ermittlung der Querkräfte und Momente in den Gurten. | Verteilung über Verhältnis der Biegesteifigkeiten mit der Annahme eines gerissenen Zuggurtes oder iterativ über effektive Steifigkeiten mit Berücksichtigung der Risse. | In der Nähe des Mittelpunktes der Gurte. | Stegbreite $\geq 2,5$ -fache der Steghöhe. Die zul. Schubspannung in den Stegen wird auf $0,17 f_{c,0.5}$ begrenzt. | $\delta = \delta_{\text{Lasten}} + \delta_{\text{Vorspannung}} + \delta_{\text{Öffnung 1}} + \delta_{\text{Öffnung 2}} + \dots$ mit $\delta_{\text{Öffnung}}$: Schubverformung der Öffnungsgurte |
| Salam et al. (1979) | Spannungsverteilung wie bei Trägern mit einer Öffnung. Wenn Öffnungen nicht in den angesetzten Spannungsblock in der Druckzone ragen, kann gleiche Tragfähigkeit wie Massivträger erreicht werden. | k. A. | k. A. | k. A. | k. A. |
| Hauri (1994) | k. A. | k. A. | k. A. | Stege müssen auf Querkraft und Biegung bemessen werden. | Größere Durchbiegung als beim Massivträger. |
| Mansur, Tan (1999) | Traglastanalyse: Versagen durch Bildung von Fließgelenken in den Gurten an den Öffnungsanschnitten. Fließbedingung über Interaktionsbeziehung zwischen Biegemoment und Normalkraft. | Vor der Rissbildung des Zuggurtes Verteilung nach Steifigkeiten der Gurte, nach Rissbildung übernimmt der Druckgurt die Querkraft. | Näherungsweise in der Mitte der Gurte. | Abstand der Stege $u \geq \{0,5 h; 2 x_i; 0,5 l_0\}$ mit x_i : Länge des Zugfeldes | Konzept von Barney übernommen. |

Anhang B

Numerische Berechnungen

Tabelle B.1: Parameterstudie – Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen – Serie T

| Nr. | Träger- länge [m] | Öffnungsgeometrie | | | | | |
|-----|-------------------------|-------------------|---------------|--------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| | | Anzahl | Länge [cm] | Höhe [cm] | Abstand Öffnungen [cm] | M/V [m] für jede Öffnung | Exzen- trizität e |
| T0a | 5,4 | - | - | - | - | - | - |
| T1 | 5,4 | 1 | 20 | 20 | - | 1,5 | - |
| T2 | 5,4 | 2 | 20 | 20 | 20 | 1,3/1,7 | - |
| T3 | 5,4 | 3 | 20 | 20 | 20 | 1,1/1,5/1,9 | - |
| T4 | 5,4 | 2 | 20 | 20 | 12 | 1,34/1,66 | - |
| T5 | 5,4 | 3 | 20 | 20 | 12 | 1,18/182 | - |
| T6 | 5,4 | 2 | 20 | 20 | 8 | 1,36/1,64 | - |
| T7 | 5,4 | 3 | 20 | 20 | 8 | 1,22/1,5/1,78 | - |
| T8 | 5,4 | 1 | 28 | 20 | - | 1,5 | - |
| T9 | 5,4 | 2 | 28 | 20 | 20 | 1,26/1,74 | - |
| T10 | 5,4 | 3 | 28 | 20 | 20 | 1,02/1,5/1,98 | - |
| T11 | 5,4 | 2 | 28 | 20 | 8 | 1,32/1,68 | - |
| T12 | 5,4 | 3 | 28 | 20 | 8 | 1,14/15/1,86 | - |
| T0b | 9,0 | - | - | - | - | - | - |
| T13 | 9,0 | 1 | 30 | 30 | - | 0,75 | - |
| T14 | 9,0 | 2 | 30 | 30 | 30 | 0,75/1,35 | - |
| T15 | 9,0 | 3 | 30 | 30 | 30 | 0,75/1,35/1,95 | - |
| T16 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 30 | 0,75/1,35/1,95/2,55 | - |
| T17 | 9,0 | 5 | 30 | 30 | 30 | 0,75/1,35/1,95/2,55 /3,15 | - |
| T18 | 9,0 | 6 | 30 | 30 | 30 | 0,75/1,35/1,95/2,55 /3,15/3,75 | - |

Fortsetzung Tabelle nächste Seite

| Nr. | Träger- länge [m] | Öffnungsgeometrie | | | | | |
|-----|-------------------------|-------------------|---------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| | | Anzahl | Länge [cm] | Höhe [cm] | Abstand Öffnungen [cm] | M/V [m] für jede Öffnung | Exzen- trizität e |
| T19 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 20 | 1,08/2,25/2,75/3,25 | - |
| T20 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 30 | 1,15/1,85/2,55/3,25 | - |
| T21 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 20 | 1,45/2,06/2,65/3,25 | - |
| T22 | 9,0 | 1 | 50 | 30 | - | 0,85 | - |
| T23 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65 | - |
| T24 | 9,0 | 3 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65/2,45 | - |
| T25 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65/2,45/3,25 | - |
| T26 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 25 | 0,93/1,68/2,43/3,18 | - |
| T27 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 20 | 1,0/1,7/2,4/3,1 | - |
| T28 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 15 | 1,08/1,73/2,38/3,03 | - |
| T29 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 10 | 1,15/1,75/2,35/2,95 | - |
| T30 | 9,0 | 1 | 200 | 30 | - | 2,05 | - |
| T31 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 5 | 0,85/1,4 | - |
| T32 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 10 | 0,85/1,45 | - |
| T33 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 15 | 0,85/1,5 | - |
| T34 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 20 | 0,85/1,55 | - |
| T35 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65 | - |
| T36 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 40 | 0,85/1,75 | - |
| T37 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 60 | 0,85/1,95 | - |
| T38 | 9,0 | 1 | 105 | 30 | - | 1,125 | - |
| T39 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 1,35/2,15 | - |
| T40 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 1,85/2,45 | - |
| T41 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 2,05/2,85 | - |
| T42 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 2,35/3,15 | - |
| T43 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65 | - 5 cm |
| T44 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 1,35/2,15 | - 5 cm |
| T45 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 1,85/2,45 | - 5 cm |
| T46 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 2,05/2,85 | - 5 cm |
| T47 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 2,35/3,15 | - 5 cm |
| T48 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65 | + 5 cm |
| T49 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 1,35/2,15 | + 5 cm |
| T50 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 1,85/2,45 | + 5 cm |
| T51 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 2,05/2,85 | + 5 cm |
| T52 | 9,0 | 2 | 50 | 30 | 30 | 2,35/3,15 | + 5 cm |

Tabelle B.2: Parameterstudie – Stahlbetonträger mit Öffnungsgruppen – Serie MV

| Nr. | Trägerlänge [m] | Öffnungsgeometrie | | | | | |
|------|-----------------|-------------------|------------|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------|
| | | Anzahl | Länge [cm] | Höhe [cm] | Abstand Öffnungen [cm] | M/V [m] für jede Öffnung | Exzentrizität e |
| MV1 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 30 | 0,85/1,45/2,05/2,65 | - |
| MV2 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 30 | 1,05/1,65/2,25/2,85 | - |
| MV3 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 30 | 1,25/1,85/2,45/3,05 | - |
| MV4 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 30 | 1,45/2,05/2,65/3,25 | - |
| MV5 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 20 | 0,85/1,35/1,85/2,35 | - |
| MV6 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 20 | 1,15/1,65/2,15/2,65 | - |
| MV7 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 20 | 1,45/1,95/2,45/2,95 | - |
| MV8 | 9,0 | 4 | 30 | 30 | 20 | 1,75/2,25/2,75/3,25 | - |
| MV9 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 30 | 0,85/1,55/2,35/2,95 | - |
| MV10 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 30 | 0,95/1,65/2,35/3,05 | - |
| MV11 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 30 | 1,05/1,75/2,45/3,15 | - |
| MV12 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 30 | 1,15/1,85/2,55/3,25 | - |
| MV13 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 20 | 0,85/1,45/2,05/2,65 | - |
| MV14 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 20 | 1,05/1,65/2,25/2,85 | - |
| MV15 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 20 | 1,25/1,85/2,45/3,05 | - |
| MV16 | 9,0 | 4 | 40 | 30 | 20 | 1,45/2,05/2,65/3,25 | - |
| MV17 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 30 | 0,85/1,65/2,45/3,25 | - |
| MV18 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 20 | 0,85/1,55/2,35/2,95 | - |
| MV19 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 20 | 0,95/1,65/2,35/3,05 | - |
| MV20 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 20 | 1,05/1,75/2,45/3,15 | - |
| MV21 | 9,0 | 4 | 50 | 30 | 20 | 1,15/1,85/2,55/3,25 | - |

Tabelle B.3: Parameterstudie – Spannbetonträger mit Einzelöffnungen

| Nr. | Öffnungsgeometrie | | | | Vorspannung | erforderl. Aufhängebew. |
|-----|-------------------|------------|---------|------|-------------|-------------------------|
| | Anzahl | Länge [cm] | M/V [m] | Form | | |
| SE0 | - | - | - | - | 100% | - |
| SE1 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 100% | 100% |
| SE2 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 75% | 100% |
| SE3 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 50% | 100% |
| SE4 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 100% | 150% |
| SE5 | 1 | 80 | 0,5 | □ | 100% | 50% |
| SE6 | 1 | 80 | 1,0 | □ | 100% | 100% |

Tabelle B.4: Parameterstudie – Spannbetonträger mit Öffnungsgruppen

| Nr. | Öffnungsgeometrie | | | | Vorspannung | erforderl. Aufhängebew. |
|-----|-------------------|------------|--------------|------|-------------|-------------------------|
| | Anzahl | Länge [cm] | Abstand [cm] | Form | | |
| S0 | - | - | - | - | 100% | - |
| S1 | 1 | 30 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S2 | 2 | 30 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S3 | 3 | 30 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S4 | 4 | 30 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S5 | 5 | 30 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S6 | 6 | 30 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S7 | 6 | 35 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S8 | 6 | 35 | 20 | □ | 100% | 100% |
| S9 | 6 | 35 | 12 | □ | 100% | 100% |
| S10 | 6 | 35 | 8 | □ | 100% | 100% |
| S11 | 6 | 25 | 30 | □ | 100% | 100% |
| S12 | 6 | 25 | 20 | □ | 100% | 100% |
| S13 | 6 | 25 | 12 | □ | 100% | 100% |
| S14 | 6 | 25 | 8 | □ | 100% | 100% |
| S15 | 6 | 30 | 20 | □ | 100% | 100% |
| S16 | 6 | 30 | 12 | □ | 100% | 100% |
| S17 | 6 | 30 | 8 | □ | 100% | 100% |
| S18 | 6 | 30 | 30 | O | 100% | 100% |
| S19 | 6 | 30 | 20 | O | 100% | 100% |
| S20 | 6 | 30 | 12 | O | 100% | 100% |
| S21 | 6 | 30 | 8 | O | 100% | 100% |
| S22 | 6 | 30 | 30 | □ | 75% | 100% |
| S23 | 6 | 30 | 30 | □ | 50% | 100% |
| S24 | 6 | 30 | 30 | □ | 100% | 200% |
| S25 | 6 | 30 | 20 | □ | 100% | 200% |
| S26 | 6 | 30 | 12 | □ | 100% | 200% |
| S27 | 6 | 30 | 8 | □ | 100% | 200% |

Tabelle B.5: Parameterstudie zur Durchbiegung – Massivträger

| Trägerbezeichnung | Massivträger | | | |
|-------------------|------------------|---------------------|-----------|-----------|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | Variation | Variation |
| D0 | / | / | / | / |

Tabelle B.6: Parameterstudie zur Durchbiegung – Untersuchung des M/V Verhältnisses

| Trägerbezeichnung | Untersuchung des M/V Verhältnisses | | | |
|-------------------|------------------------------------|---------------------|---------------|---|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | Variation M/V | |
| D1 | 1 | 60 | 0,6 | / |
| D2 | 1 | 60 | 1,2 | / |
| D3 | 1 | 60 | 1,8 | / |
| D4 | 1 | 60 | 2,4 | / |
| D5 | 1 | 60 | 3,0 | / |
| D6 | 1 | 60 | 3,6 | / |
| D7 | 2 | 60 | 1,1 | / |
| D8 | 2 | 60 | 1,2 | / |
| D9 | 2 | 60 | 1,8 | / |
| D10 | 2 | 60 | 2,4 | / |
| D11 | 2 | 60 | 3,0 | / |
| D12 | 2 | 60 | 3,6 | / |
| D13 | 3 | 60 | 1,8 | / |
| D14 | 3 | 60 | 2,4 | / |
| D15 | 3 | 60 | 2,7 | / |
| D16 | 3 | 60 | 3,0 | / |
| D17 | 4 | 60 | 2,1 | / |
| D18 | 4 | 60 | 2,4 | / |

Tabelle B.7: Parameterstudie zur Durchbiegung – Variation der vertikalen Lage der Öffnungen

| Trägerbezeichnung | Variation der vertikalen Lage der Öffnungen | | | |
|-------------------|---|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | Variation Öffnungshöhe [cm] | Vertikale Lage der Öffnungen |
| D19 | 2 | 60 | 30 | -5cm (5cm nach oben) |
| D20 | 2 | 60 | 30 | Mittellage |
| D21 | 2 | 60 | 30 | +5cm (5cm nach unten) |
| D22 | 2 | 60 | 20 | -5cm (5cm nach oben) |
| D23 | 2 | 60 | 20 | Mittellage |
| D24 | 2 | 60 | 20 | +5cm (5cm nach unten) |

Tabelle B.8: Parameterstudie zur Durchbiegung – Bewehrungsvariation der untersten Zuglage

| Trägerbezeichnung | Bewehrungsvariation der untersten Zuglage | | | |
|-------------------|---|---------------------|------------------------------|---|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | Bewehrung [cm ²] | |
| D25 | / | / | 7,35 | / |
| D26 | / | / | 14,70 | / |
| D27 | / | / | 29,40 | / |
| D28 | 4 | 30 | 7,35 | / |
| D29 | 4 | 30 | 14,70 | / |
| D30 | 4 | 30 | 29,40 | / |
| D31 | 4 | 50 | 7,35 | / |
| D32 | 4 | 50 | 14,70 | / |
| D33 | 4 | 50 | 29,40 | / |

Tabelle B.9: Parameterstudie zur Durchbiegung – Variation des Öffnungsabstandes

| Trägerbezeichnung | Variation des Öffnungsabstandes | | |
|-------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | Öffnungsabstand [cm] |
| D34 | 2 | 30 | 30 |
| D35 | 2 | 30 | 35 |
| D36 | 2 | 30 | 40 |
| D37 | 3 | 30 | 30 |
| D38 | 3 | 30 | 35 |
| D39 | 3 | 30 | 40 |
| D40 | 4 | 30 | 30 |
| D41 | 4 | 30 | 35 |
| D42 | 4 | 30 | 40 |
| D43 | 2 | 50 | 30 |
| D44 | 2 | 50 | 35 |
| D45 | 2 | 50 | 40 |
| D46 | 3 | 50 | 30 |
| D47 | 3 | 50 | 35 |
| D48 | 3 | 50 | 40 |
| D49 | 4 | 50 | 30 |
| D50 | 4 | 50 | 35 |
| D51 | 4 | 50 | 40 |

Tabelle B.10: Parameterstudie zur Durchbiegung – Variation der Öffnungshöhe

| Trägerbezeichnung | Variation der Öffnungshöhe | | |
|-------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------------|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | Variation der Öffnungshöhe [cm] |
| D52 | 1 | 40 | 40 |
| D53 | 1 | 40 | 30 |
| D54 | 1 | 40 | 20 |
| D55 | 1 | 50 | 40 |
| D56 | 1 | 50 | 30 |
| D57 | 1 | 50 | 20 |
| D58 | 1 | 60 | 40 |
| D59 | 1 | 60 | 30 |
| D60 | 1 | 60 | 20 |
| D61 | 1 | 70 | 40 |
| D62 | 1 | 70 | 30 |
| D63 | 1 | 70 | 20 |
| D64 | 1 | 80 | 40 |
| D65 | 1 | 80 | 30 |
| D66 | 1 | 80 | 20 |
| D67 | 1 | 90 | 40 |
| D68 | 1 | 90 | 30 |
| D69 | 1 | 90 | 20 |
| D70 | 1 | 100 | 40 |
| D71 | 1 | 100 | 30 |
| D72 | 1 | 100 | 20 |

Tabelle B.11: Parameterstudie zur Durchbiegung – Variation der Pfostenbewehrung

| Trägerbezeichnung | Bewehrungsvariation der Pfostenbewehrung | | |
|-------------------|--|---------------------|------------------------|
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen | 1.Lage / 2. Lage [cm²] |
| D73 | 4 | 30 | 1,01 / 1,01 |
| D74 | 4 | 30 | 1,51 / 1,51 |
| D75 | 4 | 30 | 2,01 / 2,01 |
| D76 | 4 | 30 | 4,02 / 4,02 |
| D77 | 4 | 50 | 1,01 / 1,01 |
| D78 | 4 | 50 | 1,51 / 1,51 |
| D79 | 4 | 50 | 2,01 / 2,01 |
| D80 | 4 | 50 | 4,02 / 4,02 |

Tabelle B.12: Parameterstudie zur Durchbiegung – Variation der Öffnungslänge und –anzahl

| Variation der Öffnungslänge und -anzahl | | |
|---|------------------|---------------------|
| Trägerbezeichnung | Variation von | |
| | Anzahl Öffnungen | Länge der Öffnungen |
| D81 | 1 | 30 |
| D82 | 2 | 30 |
| D83 | 3 | 30 |
| D84 | 4 | 30 |
| D85 | 5 | 30 |
| D86 | 6 | 30 |
| D87 | 1 | 40 |
| D88 | 2 | 40 |
| D89 | 3 | 40 |
| D90 | 4 | 40 |
| D91 | 5 | 40 |
| D92 | 1 | 50 |
| D93 | 2 | 50 |
| D94 | 3 | 50 |
| D95 | 4 | 50 |
| D96 | 1 | 60 |
| D97 | 2 | 60 |
| D98 | 3 | 60 |
| D99 | 4 | 60 |
| D100 | 1 | 70 |
| D101 | 2 | 70 |
| D102 | 3 | 70 |
| D103 | 1 | 80 |
| D104 | 2 | 80 |
| D105 | 3 | 80 |
| D106 | 1 | 90 |
| D107 | 2 | 90 |
| D108 | 3 | 90 |
| D109 | 1 | 100 |
| D110 | 2 | 100 |
| D111 | 3 | 100 |

Anhang C

M-N-Interaktionsdiagramme nach DIN 1045-1

Bewehrungsverhältnis

$$\lambda = A_{s2}/(A_{s1}+A_{s2})$$

$$\lambda = 0,2$$

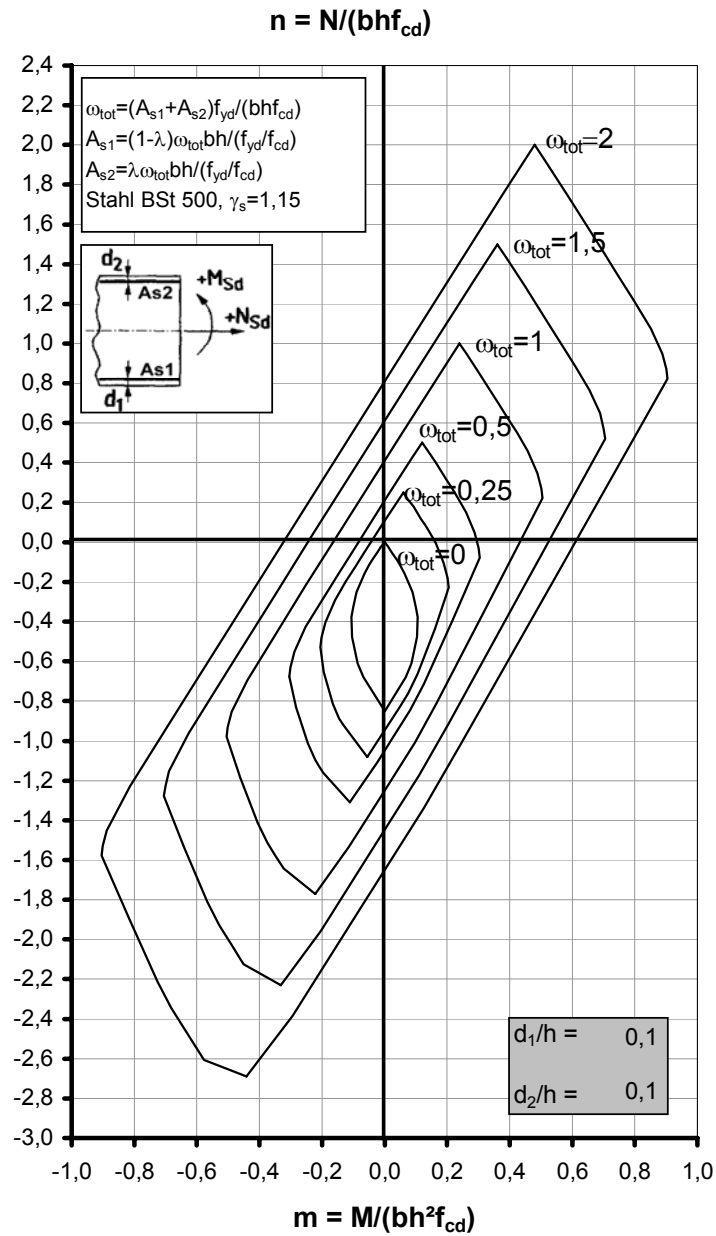


Abbildung C.1: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,2$ und $d_{1,2}/h = 0,1$

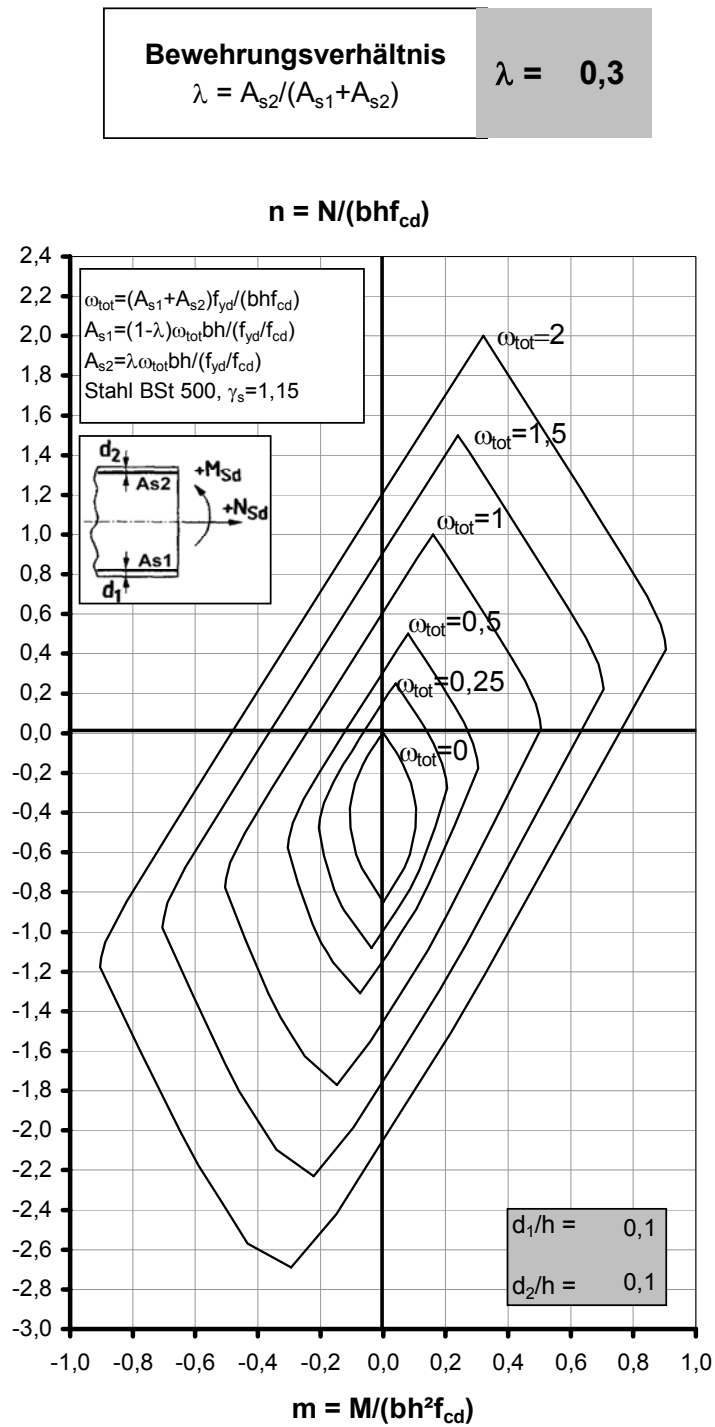


Abbildung C.2: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,3$ und $d_{1,2}/h = 0,1$

Bewehrungsverhältnis

$$\lambda = A_{s2}/(A_{s1}+A_{s2})$$

$$\lambda = 0,4$$

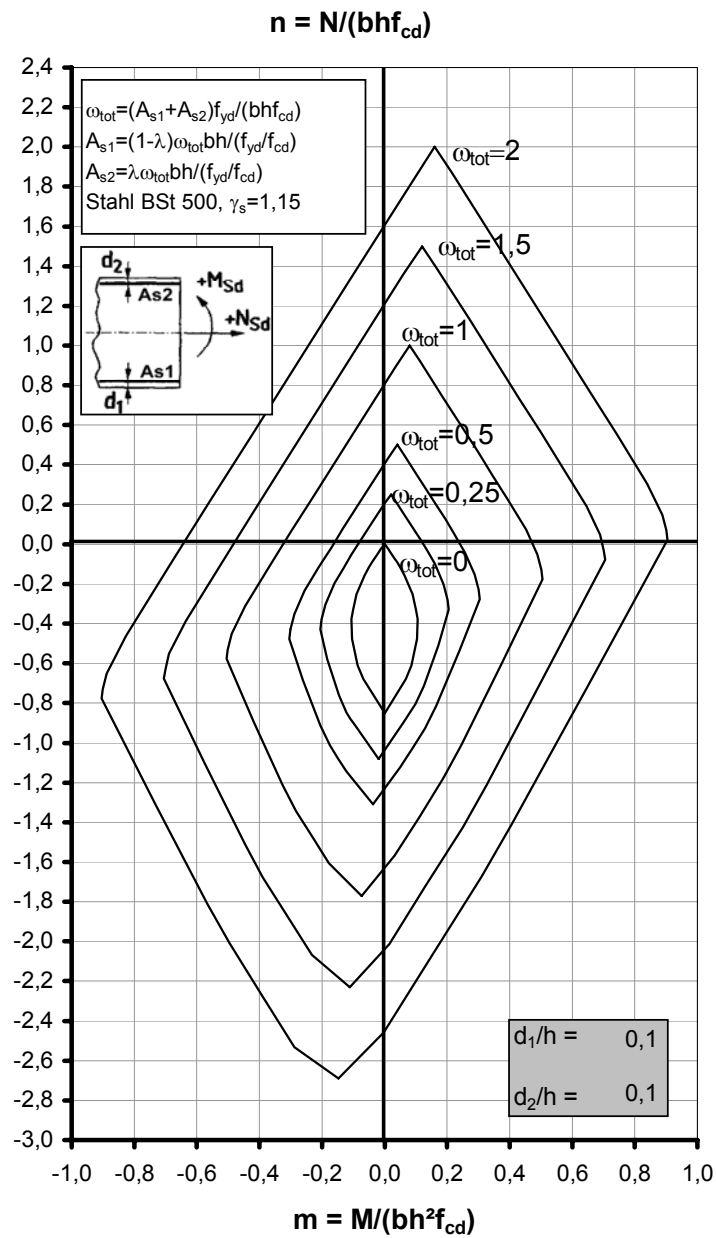


Abbildung C.3: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,4$ und $d_{1,2}/h = 0,1$

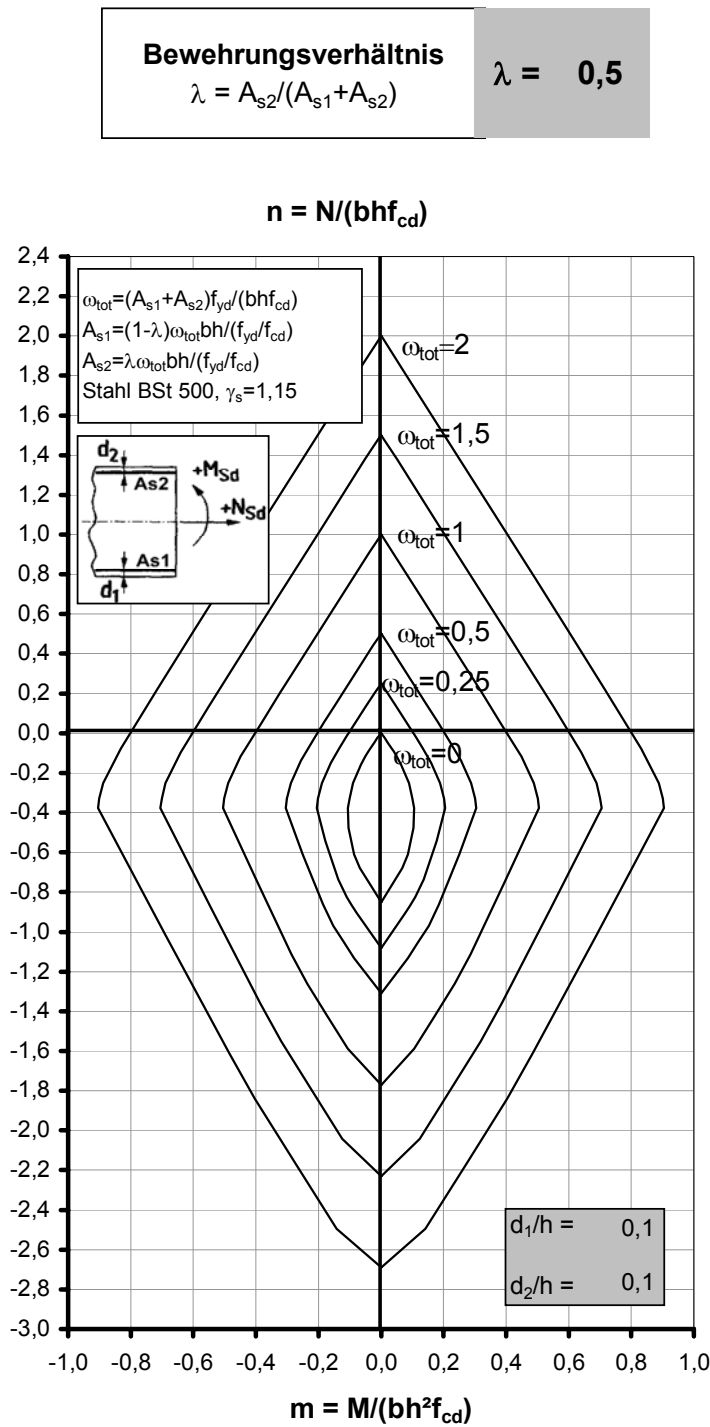


Abbildung C.4: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,5$ und $d_{1,2}/h = 0,1$

Bewehrungsverhältnis

$$\lambda = A_{s2}/(A_{s1}+A_{s2})$$

$$\lambda = 0,2$$

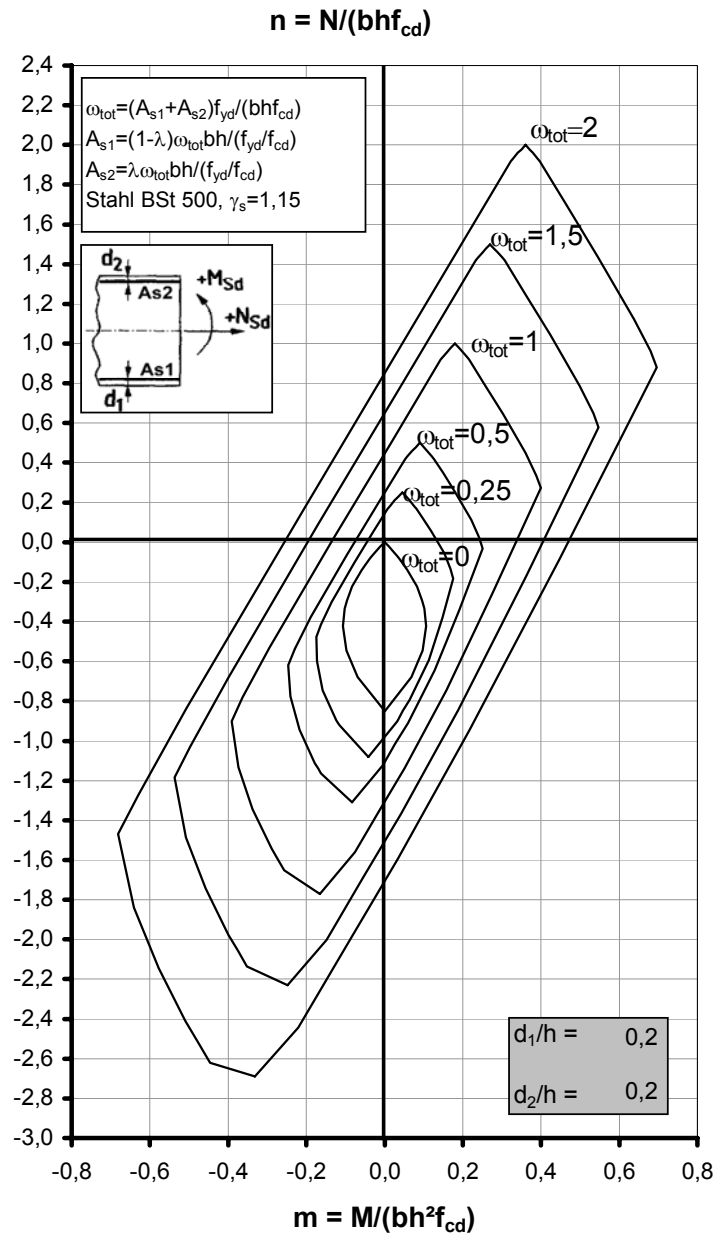


Abbildung C.5: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,2$ und $d_{1,2}/h = 0,2$

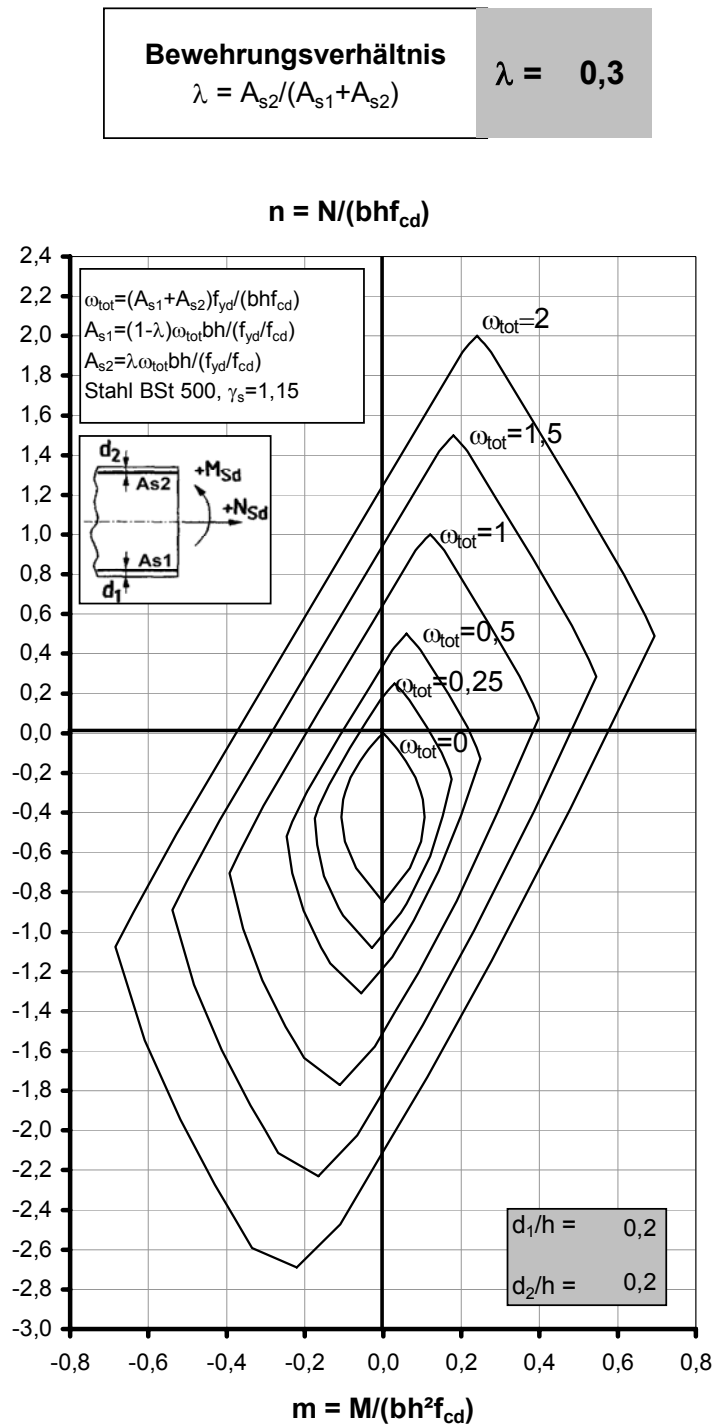


Abbildung C.6: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,3$ und $d_{1,2}/h = 0,2$

Bewehrungsverhältnis

$$\lambda = A_{s2}/(A_{s1}+A_{s2})$$

$$\lambda = 0,4$$

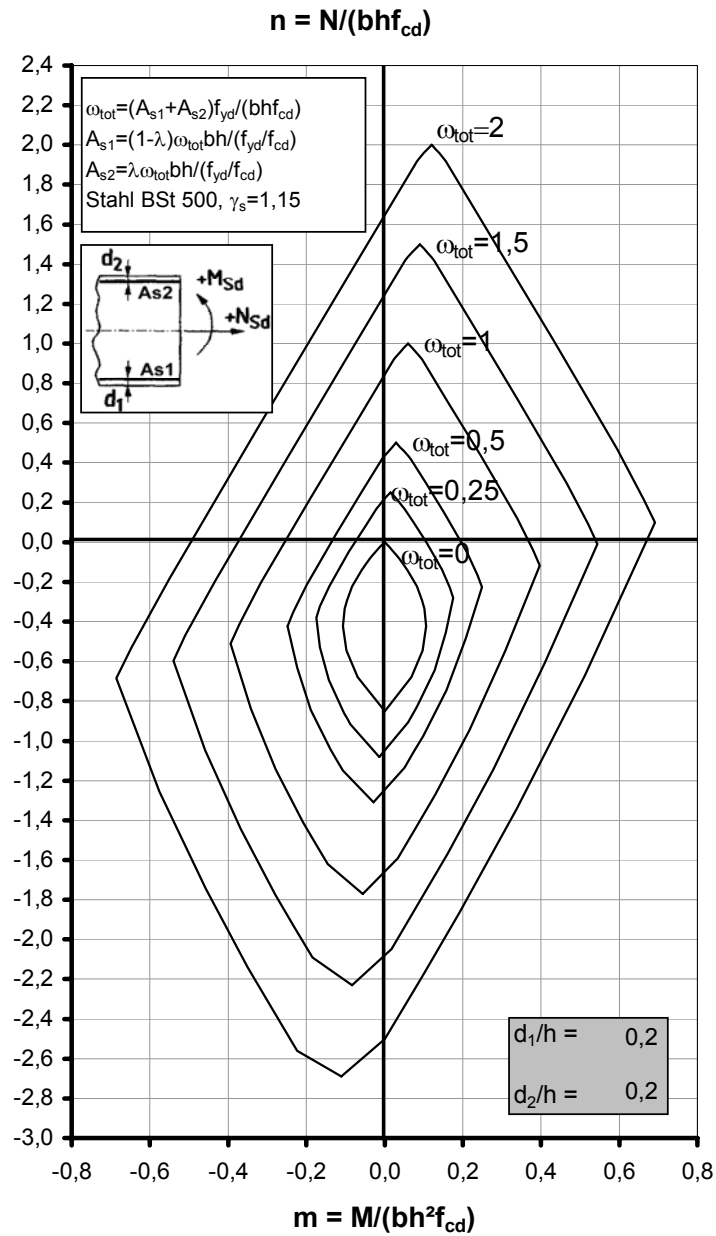


Abbildung C.7: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,4$ und $d_{1,2}/h = 0,2$

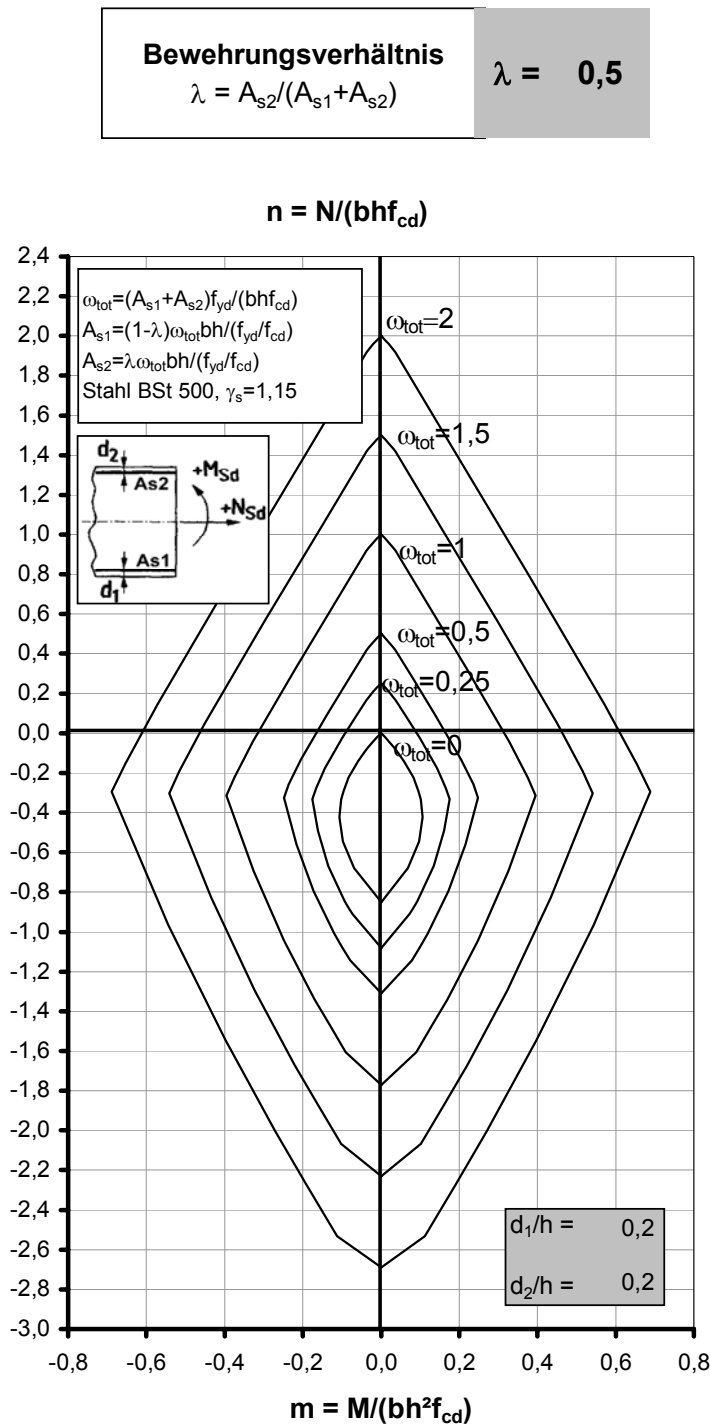


Abbildung C.8: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,5$ und $d_{1,2}/h = 0,2$

Bewehrungsverhältnis

$$\lambda = A_{s2}/(A_{s1}+A_{s2})$$

$$\lambda = 0,2$$

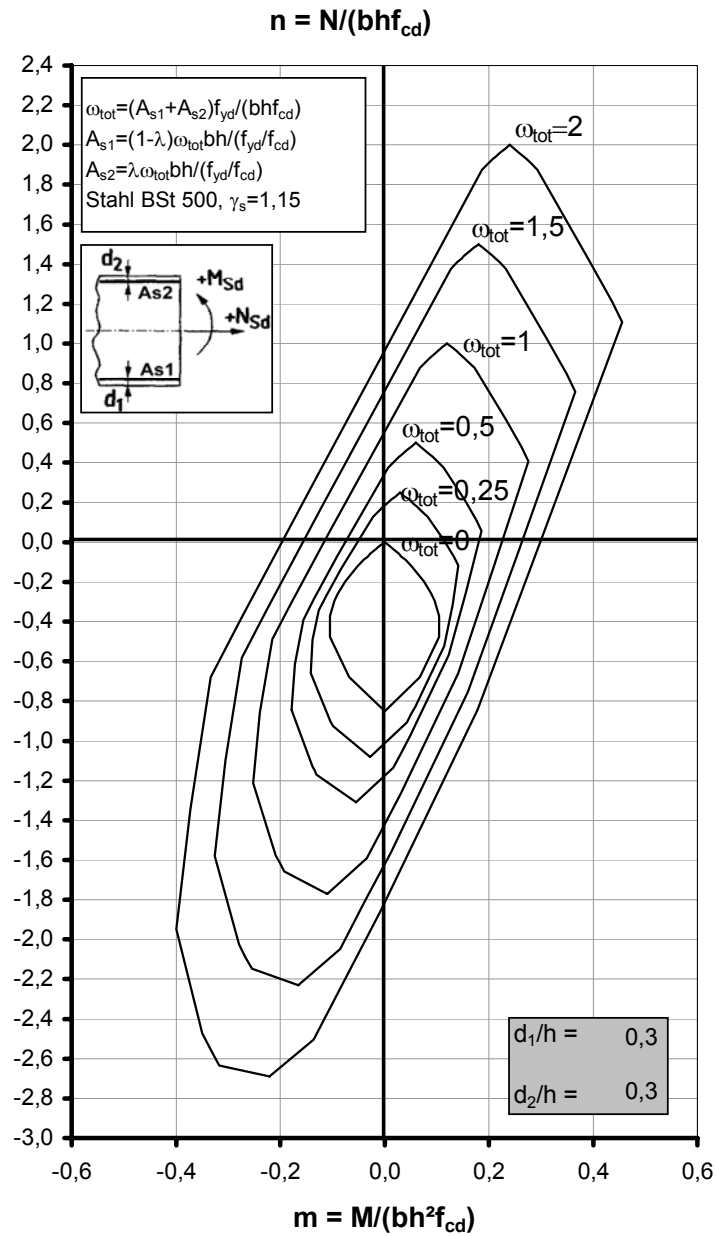


Abbildung C.9: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,2$ und $d_{1,2}/h = 0,3$

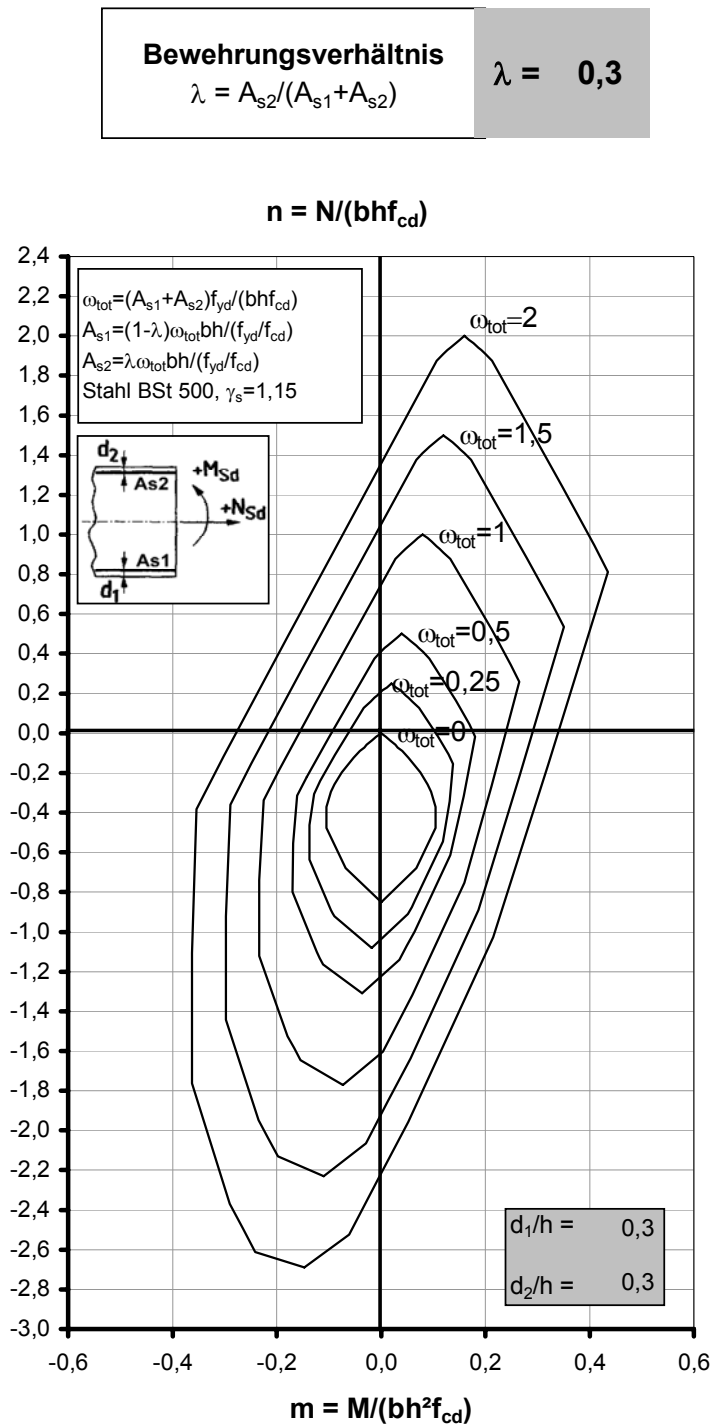


Abbildung C.10: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,3$ und $d_{1,2}/h = 0,3$

Bewehrungsverhältnis

$$\lambda = A_{s2}/(A_{s1}+A_{s2})$$

$$\lambda = 0,4$$

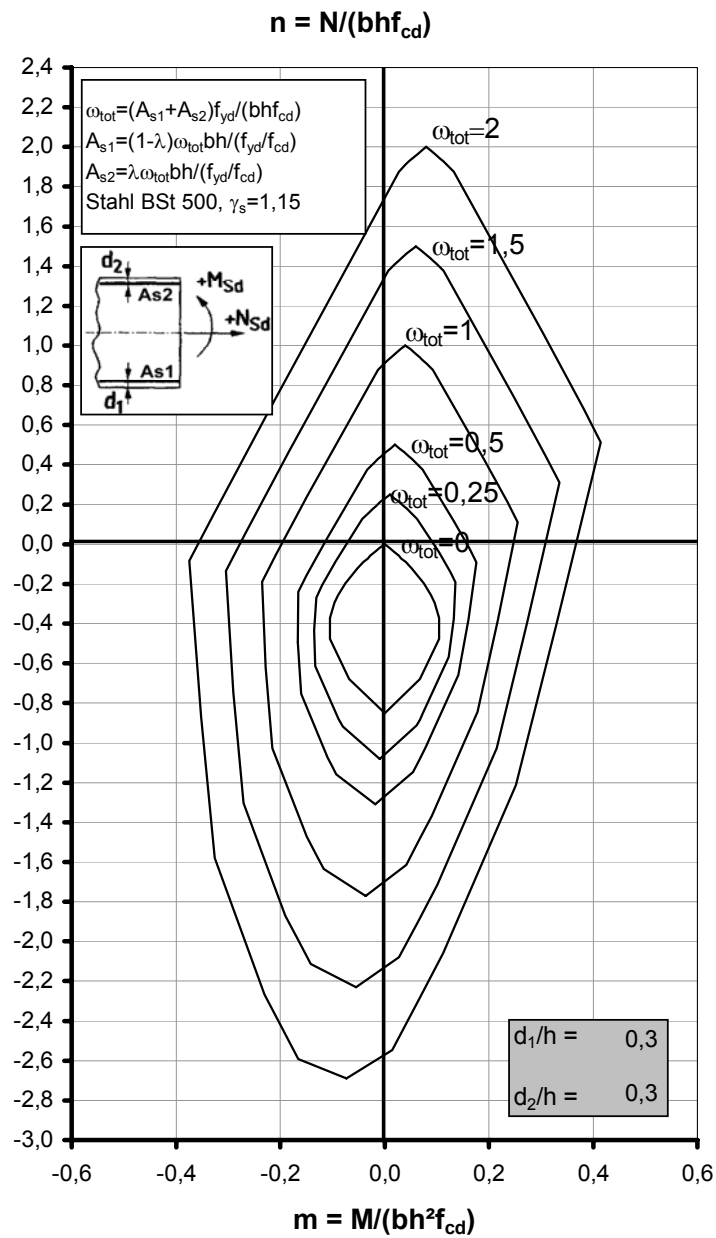


Abbildung C.11: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,4$ und $d_{1,2}/h = 0,3$

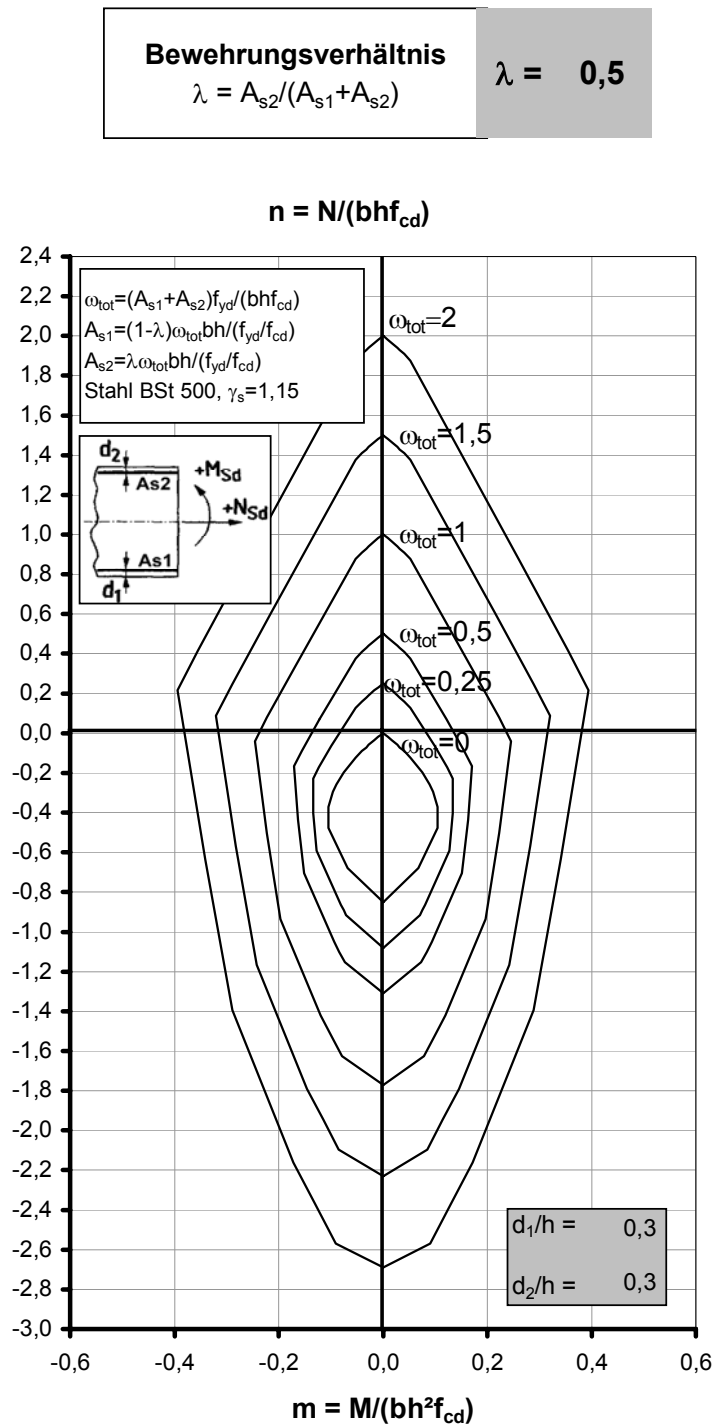


Abbildung C.12: M-N-Interaktionsdiagramm für $\lambda = 0,5$ und $d_{1,2}/h = 0,3$

Anhang D

Zahlenbeispiel

Im Folgenden wird anhand eines Zahlenbeispiels das neu entwickelte Bemessungskonzept vorgestellt. Die Bemessung erfolgt nach DIN 1045-1.

1 Statisches System und Belastung

Beton C30/37

Betonstahl S 500

Breite $b=30$ cm

Umweltklasse XC1: mit $\phi_{\max} = 20$ mm $\Rightarrow c_{\text{nom}} = 3$ cm

Belastung: $G_k = 50$ kN

$Q_k = 100$ kN

$\psi_2 = 0,8$

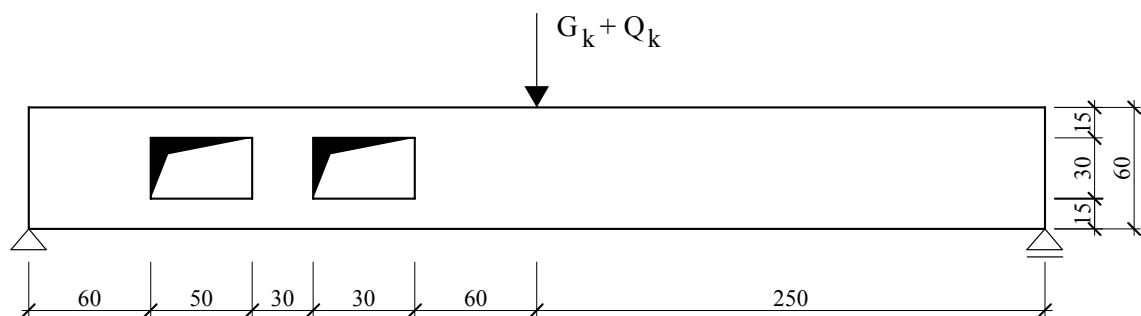


Abbildung D.1: Statisches System

2 Bemessung globales System

Mit einem globalen Biegemoment von $M_{Eds} = 271,9 \text{ kNm}$ ergibt sich aus der Biegebemessung: erf $A_{s1} = 10,7 \text{ cm}^2$

Gewählt: $A_{s1}: 4 \text{ } \phi 20 = 12,57 \text{ cm}^2$

Mit einer globalen Querkraft von $V_{Ed} = 108,8 \text{ kN}$ ergibt sich aus der Querkraftbemessung: erf $a_{sbue} = 2,7 \text{ cm}^2/\text{m}$

Gewählt: $a_{sbue}: \phi 8/20 = 5,02 \text{ cm}^2/\text{m}$

3 Vorbemessung der Gurte

| Öffnung 1: | Öffnung 2: |
|--|--|
| $\frac{M}{V} = 0,85 \text{ m} \quad \text{Annahme: } \frac{V_c}{V_{tot}} = 0,58$ | $\frac{M}{V} = 1,65 \text{ m} \quad \text{Annahme: } \frac{V_c}{V_{tot}} = 0,65$ |
| $N_c = N_t = \frac{217,5 \cdot 0,85}{2 \cdot 0,45} = \pm 205,4 \text{ kN}$ | $N_c = N_t = \frac{217,5 \cdot 1,65}{2 \cdot 0,45} = \pm 398,8 \text{ kN}$ |
| Zuggurt | Zuggurt |
| $V_t = (1 - 0,58) \cdot 108,8 = 45,7 \text{ kN}$ | $V_t = (1 - 0,65) \cdot 108,8 = 38,1 \text{ kN}$ |
| $M_t = \pm 45,7 \cdot 0,25 = \pm 11,42 \text{ kNm}$ | $M_t = \pm 38,1 \cdot 0,25 = \pm 9,52 \text{ kNm}$ |
| $m = \frac{\pm 0,0114}{0,3 \cdot 0,2^2 \cdot 17} = \pm 0,06$ | $m = \frac{\pm 0,0095}{0,3 \cdot 0,2^2 \cdot 17} = \pm 0,05$ |
| $n = \frac{0,205}{0,3 \cdot 0,2 \cdot 17} = 0,2$ | $n = \frac{0,399}{0,3 \cdot 0,2 \cdot 17} = 0,39$ |
| Mit $\lambda = 0,3$ und $d_1/d = 0,3$ | Mit $\lambda = 0,3$ und $d_1/d = 0,3$ |
| → Abbildung C.10 | → Abbildung C.10 |
| $\max \omega_{tot} = 0,5$ | $\max \omega_{tot} = 0,65$ |

$$A_{s1} = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot 20 \cdot \frac{17}{435} = 8,21 \text{ cm}^2$$

$$A_{s2} = 0,3 \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot 20 \cdot \frac{17}{435} = 3,52 \text{ cm}^2$$

Gewählt: A_{s1} : 4 \emptyset 20 = 12,57 cm²
 A_{s2} : 2 \emptyset 20 = 6,28 cm²

Druckgurt

$$V_c = 0,58 \cdot 108,8 = 63,1 \text{ kN}$$

$$M_c = \pm 63,1 \cdot 0,25 = \pm 15,8 \text{ kNm}$$

$$m = \frac{\pm 0,016}{0,3 \cdot 0,2^2 \cdot 17} = \pm 0,08$$

$$n = \frac{-0,205}{0,3 \cdot 0,2 \cdot 17} = -0,2$$

Mit $\lambda = 0,5$ und $d_1/d = 0,3$

→ Abbildung C.12

$$\max \omega_{\text{tot}} = 0,2$$

$$A_{s3} = A_{s4} = 0,5 \cdot 0,2 \cdot 30 \cdot 20 \cdot \frac{17}{435} = 2,34 \text{ cm}^2$$

Gewählt: A_{s3} ; A_{s4} : 2 \emptyset 20 = 6,28 cm²

$$A_{s1} = 0,7 \cdot 0,65 \cdot 30 \cdot 20 \cdot \frac{17}{435} = 10,67 \text{ cm}^2$$

$$A_{s2} = 0,3 \cdot 0,65 \cdot 30 \cdot 20 \cdot \frac{17}{435} = 4,57 \text{ cm}^2$$

Gewählt: A_{s1} : 4 \emptyset 20 = 12,57 cm²
 A_{s2} : 2 \emptyset 20 = 6,28 cm²

Druckgurt

$$V_c = 0,65 \cdot 108,8 = 70,7 \text{ kN}$$

$$M_c = \pm 70,7 \cdot 0,25 = \pm 17,68 \text{ kNm}$$

$$m = \frac{\pm 0,018}{0,3 \cdot 0,2^2 \cdot 17} = \pm 0,09$$

$$n = \frac{-0,399}{0,3 \cdot 0,2 \cdot 17} = -0,39$$

Mit $\lambda = 0,5$ und $d_1/d = 0,3$

→ Abbildung C.12

$$\max \omega_{\text{tot}} = 0,1$$

$$A_{s3} = A_{s4} = 0,5 \cdot 0,1 \cdot 30 \cdot 20 \cdot \frac{17}{435} = 1,17 \text{ cm}^2$$

Gewählt: A_{s3} ; A_{s4} : 2 \emptyset 20 = 6,28 cm²

4 Querkraftverteilung

Bereich 1

Ideelle Querschnittswerte für Öffnung 1 und Öffnung 2:

$$\frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{32000} = 6,25 \quad (\text{Gl. 6.19})$$

$$A_{i,t} = 0,2 \cdot 0,3 + (6,25 - 1) \cdot (12,57 \cdot 10^{-4} + 6,28 \cdot 10^{-4}) = 0,070 \text{ m}^2 \quad (\text{Gl. 6.27})$$

$$A_{i,c} = 0,2 \cdot 0,3 + (6,25 - 1) \cdot 2 \cdot 6,28 \cdot 10^{-4} = 0,067 \text{ m}^2 \quad (\text{Gl. 6.32})$$

$$I_{i,t} = \frac{0,3 \cdot 0,2^3}{12} + (6,25 - 1) \cdot (12,57 \cdot 10^{-4} + 6,28 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,05^2 = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \quad (\text{Gl. 6.17})$$

$$I_{i,c} = \frac{0,3 \cdot 0,2^3}{12} + (6,25 - 1) \cdot 2 \cdot 6,28 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05^2 = 2,16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 \quad (\text{Gl. 6.18})$$

$$\frac{V_c^{(1)}}{V_{\text{tot}}^{(1)}} = \frac{2,16}{2,16 + 2,25} = 0,49 \quad (\text{Gl. 6.16})$$

$$\text{Zuggurt } f_{\text{ct,fl}} = 1,2 \cdot 2,0 = 2,4 \text{ N/mm}^2 = 2400 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Gl. 6.21})$$

$$\text{Druckgurt } f_{\text{ct,fl}} = 2,0 \cdot 2,0 = 4,0 \text{ N/mm}^2 = 4000 \text{ kN/m}^2 \quad (\text{Gl. 6.24})$$

| Öffnung 1 | Öffnung 2 |
|---|---|
| $V_{\text{tot}}^{(1)} = \frac{2400}{\frac{0,85}{0,07} \cdot 0,5 + \frac{0,51 \cdot 0,5 \cdot 0,2}{4 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4}}} = 38,3 \text{ kN}$ | $V_{\text{tot}}^{(1)} = \frac{2400}{\frac{1,65}{0,07} \cdot 0,5 + \frac{0,51 \cdot 0,5 \cdot 0,2}{4 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4}}} = 35,1 \text{ kN}$ |
| (Gl. 6.26) | (Gl. 6.26) |
| $V_t^{(1)} = (1 - 0,49) \cdot 38,3 = 19,5 \text{ kN}$ | $V_t^{(1)} = (1 - 0,49) \cdot 35,1 = 17,9 \text{ kN}$ |
| Bereich 2 | Bereich 2 |
| $V_{\text{tot}}^{(2)} = \frac{4000 + \frac{19,5 \cdot 0,5 \cdot 0,2}{4 \cdot 2,16 \cdot 10^{-4}}}{\frac{0,5 \cdot 0,2}{4 \cdot 2,26 \cdot 10^{-4}} - \frac{0,85}{0,067 \cdot 0,5}} = 69,4 \text{ kN}$ | $V_{\text{tot}}^{(2)} = \frac{4000 + \frac{17,9 \cdot 0,5 \cdot 0,2}{4 \cdot 2,16 \cdot 10^{-4}}}{\frac{0,5 \cdot 0,2}{4 \cdot 2,26 \cdot 10^{-4}} - \frac{1,65}{0,067 \cdot 0,5}} = 91,3 \text{ kN}$ |
| (Gl. 6.30) | (Gl. 6.30) |
| $\frac{V_c^{(2)}}{V_{\text{tot}}^{(2)}} = \frac{69,4 - 19,5}{69,4} = 0,72 \quad (\text{Gl. 6.29})$ | $\frac{V_c^{(2)}}{V_{\text{tot}}^{(2)}} = \frac{91,3 - 17,9}{91,3} = 0,80 \quad (\text{Gl. 6.29})$ |

Bereich 3

Zuggurt:

$$\mu_{\text{ges}} = \frac{12,57 + 6,28}{30 \cdot 15} = 0,042$$

$$n_t = \frac{0,205}{0,3 \cdot 0,15 \cdot 30} = 0,151 \quad (\text{Gl. 6.35})$$

$$\chi_t = 15 \cdot 0,042 - 0,25 + (0,151 - 0,5)^2 = 0,50$$

(Gl. 6.34)

Druckgurt:

$$\mu_{\text{ges}} = \frac{2 \cdot 6,28}{30 \cdot 15} = 0,028$$

$$n_c = \frac{0,205}{0,3 \cdot 0,15 \cdot 30} = 0,151 \quad (\text{Gl. 6.37})$$

$$\chi_c = 15 \cdot 0,028 + 0,4 - (0,151 - 0,5)^2 = 0,70$$

(Gl. 6.36)

$$\frac{V_c^{(3)}}{V_{\text{tot}}^{(3)}} = \frac{0,70}{0,50 + 0,70} = 0,58 \quad (\text{Gl. 6.38})$$

Bereich 3

Zuggurt:

$$\mu_{\text{ges}} = \frac{12,57 + 6,28}{30 \cdot 15} = 0,042$$

$$n_t = \frac{0,339}{0,3 \cdot 0,15 \cdot 30} = 0,30 \quad (\text{Gl. 6.35})$$

$$\chi_t = 15 \cdot 0,042 - 0,25 + (0,30 - 0,5)^2 = 0,42$$

(Gl. 6.34)

Druckgurt:

$$\mu_{\text{ges}} = \frac{2 \cdot 6,28}{30 \cdot 15} = 0,028$$

$$n_c = \frac{0,339}{0,3 \cdot 0,15 \cdot 30} = 0,30 \quad (\text{Gl. 6.37})$$

$$\chi_c = 15 \cdot 0,028 + 0,4 - (0,30 - 0,5)^2 = 0,78$$

(Gl. 6.36)

$$\frac{V_c^{(3)}}{V_{\text{tot}}^{(3)}} = \frac{0,78}{0,42 + 0,78} = 0,65 \quad (\text{Gl. 6.38})$$

Somit ergeben sich folgende Bemessungsschnittgrößen in den Gurten:

| Öffnung 1 | Öffnung 2 |
|--|--|
| $V_{\text{cd}} = 0,58 \cdot 108,8 = 63,1 \text{ kN}$ | $V_{\text{cd}} = 0,65 \cdot 108,8 = 70,7 \text{ kN}$ |
| $V_{\text{td}} = (1 - 0,58) \cdot 108,8 = 45,7 \text{ kN}$ | $V_{\text{td}} = (1 - 0,65) \cdot 108,8 = 38,1 \text{ kN}$ |

5 Biegebemessung

Die geschätzten Werte für die Querkraftverteilung aus der Vorbemessung stimmen mit den berechneten Werten aus Abschnitt 4 überein. Daher wird für die Biegebemessung die Vorbemessung aus Abschnitt 3 maßgebend.

6 Querkraftbemessung

| Öffnung 1 | Öffnung 2 |
|---|---|
| Zuggurt: $V_{Rd,ct} = [0,1 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,02 \cdot 30)^{1/3} - 0,12 \cdot 3,08] \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cdot 1000 = 18,6 \text{ kN}$ $a_{sw} = \frac{45,7}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 1,0} = 7,8 \text{ cm/m}^2$ Gewählt: Bügel \emptyset 6/5cm = 11,3 cm ² | Zuggurt: $V_{Rd,ct} = [0,1 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,02 \cdot 30)^{1/3} - 0,12 \cdot 5,98] \cdot 0,3 \cdot 0,15 \cdot 1000 = 2,94 \text{ kN}$ $a_{sw} = \frac{38,1}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 1,0} = 6,5 \text{ cm/m}^2$ Gewählt: Bügel \emptyset 6/5cm = 11,3 cm ² |
| Druckgurt: $a_{sw} = \frac{63,1}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 1,2} = 9,0 \text{ cm/m}^2$ Gewählt: Bügel \emptyset 6/5cm = 11,3 cm ² | Druckgurt: $a_{sw} = \frac{70,7}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 1,2} = 10,0 \text{ cm/m}^2$ Gewählt: Bügel \emptyset 6/5cm = 11,3 cm ² |

7 Pfostenbemessung

Bestimmung der Grenzöffnungsabstände:

$$\frac{x_p}{h} = \frac{0,3}{0,7} = 0,43 \begin{cases} < 0,8 \text{ (Gl.6.39)} \\ > 0,1 \text{ (Gl.6.40)} \end{cases}$$

→ Die Öffnungen werden als Öffnungsgruppe bemessen.

Die Querkraftverteilung wurde bereits in Abschnitt 4 bestimmt. Daher berechnet sich die Lage des Momentennullpunktes im Pfosten wie folgt:

$$\frac{z_p}{h_c} = 0,64 \text{ (Gl. 6.43)}$$

Die horizontale Kraft im Pfosten bestimmt sich zu:

$$H_p = \frac{217,5 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,5} = 174 \text{ kN (Gl. 6.48)}$$

Dadurch ergibt sich das maximale Moment am oberen Pfostenende zu:

$$M_{\max} = 174 \cdot 0,64 \cdot 0,5 = 55,7 \text{ kNm} \quad (\text{Gl. 6.49})$$

Biegebemessung des Pfostens:

$$\mu = \frac{0,056}{0,3 \cdot 0,25^2 \cdot 17} = 0,18$$

$$A_{s,1} = \frac{1}{435} \cdot 17 \cdot 0,1882 \cdot 30 \cdot 25 = 5,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Gewählt: } A_{s1}: 2 \text{ } \emptyset 20 = 6,28 \text{ cm}^2$$

Querkraftbemessung des Pfostens:

$$V_{\text{Ed}} = 174 \text{ kN}$$

$$V_{\text{Rd,c}} = 1,0 \cdot 2,4 \cdot 0,1 \cdot 30^{1/3} \cdot 1,0 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 0,25 \cdot 1000 = 40,26 \text{ kN}$$

$$\cot \theta = \frac{1,2}{1 - \frac{40,26}{174,0}} = 1,56$$

$$a_{\text{sw}} = \frac{174}{43,5 \cdot 0,9 \cdot 0,15 \cdot 1,56} = 37,90 \text{ cm / m}^2$$

$$\text{Gewählt: } a_{\text{sbue}}: \emptyset 12/5 \text{ cm} = 45,24 \text{ cm}^2/\text{m}$$

8 Bauliche Durchbildung

Die Berechnung erfolgt nach Ehmann [EHM02]:

| Öffnung 1 | Öffnung 2 |
|---|---|
| $A_{sHtot} = \frac{1,6 \cdot 108,8}{43,5} = 4,0 \text{ cm}^2$ | $A_{sHtot} = \frac{1,6 \cdot 108,8}{43,5} = 4,0 \text{ cm}^2$ |
| $A_{sH2} = \frac{1,3 \cdot 108,8}{43,5} = 3,3 \text{ cm}^2$ | $A_{sH2} = \frac{1,3 \cdot 108,8}{43,5} = 3,3 \text{ cm}^2$ |
| $A_{sD} = \frac{0,52 \cdot 4,00}{\sin 45^\circ} = 2,4 \text{ cm}^2$ | $A_{sD} = \frac{0,28 \cdot 4,00}{\sin 45^\circ} = 1,3 \text{ cm}^2$ |
| $A_{sH1} = 4,00 - 2,4 \cdot \sin 45^\circ = 2,0 \text{ cm}^2$ | $A_{sH1} = 4,00 - 2,4 \cdot \sin 45^\circ = 2,9 \text{ cm}^2$ |
| Gewählt: | Gewählt: |
| $A_{sH1} : \text{Bügel } 2\phi 10 = 3,14 \text{ cm}^2$ | $A_{sH1} : \text{Bügel } 2\phi 10 = 3,14 \text{ cm}^2$ |
| $A_{sH2} : \text{Bügel } 2\phi 12 = 4,5 \text{ cm}^2$ | $A_{sH2} : \text{Bügel } 2\phi 12 = 4,5 \text{ cm}^2$ |
| $A_{sD} : 2\phi 12 = 2,26 \text{ cm}^2$ | $A_{sD} : 2\phi 12 = 2,26 \text{ cm}^2$ |

9 Durchbiegung

Aus nichtlinearen Berechnungen unter Berücksichtigung der Rissbildung des zeitabhängigen Materialverhaltens von Beton ergibt sich folgende Durchbiegung für einen Massivträger:

$$w_{\text{Massiv}} = 7,505 \text{ mm}$$

Vergrößerung der Durchbiegung durch zwei Öffnungen:

$$\frac{w_{\text{Öffnung}}}{w_{\text{Massiv}}} = \left(4,47 \cdot 10^{-4} \cdot e^{5,6} + 0,5128 \cdot \frac{50}{500} \right) \cdot 2 + 1 = 1,34 \quad (\text{Gl. 6.62})$$

mit

$$\delta = 15 \frac{50}{500} + 8,2 \frac{30}{60} = 5,6 \quad (\text{Gl. 6.63})$$

$$w_{\text{Öffnung}} = 1,34 \cdot 7,51 = 10,1 \text{ mm}$$

$$\frac{w_{\text{Öffnung}}}{1} = \frac{10,1}{5000} = \frac{1}{497}$$

10 Bewehrungsskizze

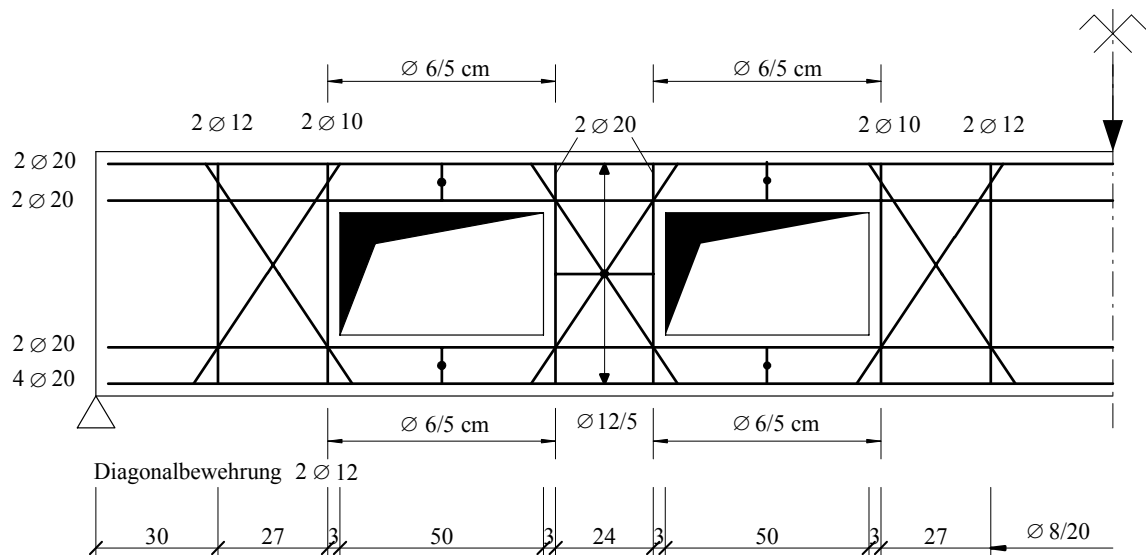


Abbildung D.2: Bewehrungsskizze

